

Desarrollo de un infiltrómetro automático y su aplicación en campo

E. Amézketa Lizarraga *, R. Gazol Lostao, R. Aragüés Lafarga

Unidad de Suelos y Riegos. S.I.A. - D.G.A.

Apto. 727, 50080 Zaragoza

espe@amezketa.net

RESUMEN

La cuantificación de la tasa de infiltración del agua en el suelo es de gran interés para el diseño eficiente de los sistemas de riego y en estudios medioambientales y edáficos relacionados con la determinación de la erosión del suelo, el análisis de su susceptibilidad al encostramiento y la recuperación de los suelos afectados por sales. El elevado tiempo que exigen los métodos clásicos de medida de la tasa de infiltración limita el número de ensayos y el análisis de la elevada variabilidad espacial inherente a este atributo, por lo que es necesario disponer de nuevos métodos automatizados más rápidos y precisos. Este trabajo presenta el desarrollo de un nuevo infiltrómetro automático (IA) de campo y su aplicación al análisis de la infiltración característica de siete suelos de la cuenca media del Ebro. Se han construido y puesto a punto 18 IA. Para el conjunto de estos IA, el 94 % de los errores entre los valores computados y medidos manualmente fueron inferiores a 0,6 mm, y el 100 % inferiores a 1 mm. Cinco suelos presentaron infiltraciones finales (IF) moderadamente lentas (entre 18 y 6 mm h⁻¹), consideradas adecuadas para el riego por superficie, y los dos suelos restantes presentaron IF lentas (< 4 mm h⁻¹), insuficientes para el riego por superficie y con un riesgo elevado de encharcamiento, escorrentía y erosión. Las IF de los suelos estudiados presentaron una elevada variabilidad espacial (CV de las IF medias entre 30 y 122 %). La infiltración de estos suelos se vio afectada por su encostramiento superficial, el origen químico o físico del sellado superficial y la baja permeabilidad de algunos de los horizontes sub-superficiales. La conclusión general de este trabajo es que el IA es una excelente herramienta de trabajo para la cuantificación en campo de la infiltración del agua en el suelo.

Palabras clave: infiltración, encostramiento, dispersión química, dispersión física

* Autor para correspondencia

Recibido: 5-7-01

Aceptado para su publicación: 21-11-01

INTRODUCCIÓN

La infiltración del agua en el suelo es uno de los procesos más importantes del ciclo hidrológico y afecta de forma relevante a la productividad y sostenibilidad de la agricultura, ya que su reducción conduce a efectos no deseados tales como el incremento de la escorrentía superficial, la erosión del suelo, la pérdida de agroquímicos y la disminución de las reservas de agua en el suelo.

Cada suelo tiene una tasa de infiltración característica que depende de sus propiedades intrínsecas, pero también del manejo del suelo y del agua de riego, así como de ciertos factores climáticos como la lluvia y el viento. La caracterización de la tasa de infiltración de los suelos es fundamental no sólo para el diseño y el manejo apropiado de los sistemas de riego, sino también para detectar las pérdidas de estabilidad estructural, cuantificar la susceptibilidad de los suelos al sellado superficial o encostramiento, y estimar ciertas propiedades físicas del suelo tales como la distribución del tamaño de poros o el transporte de agua y solutos (Reynolds y Elrick, 1990; Wang *et al.*, 1998; Angulo-Jaramillo *et al.*, 2000).

La cuantificación de la infiltración en campo se efectúa clásicamente mediante la medida en el tiempo del descenso de una lámina de agua contenida en un simple o doble anillo clavado en el suelo (Bouwer, 1986). Este método es sencillo y barato, aunque extremadamente tedioso y relativamente impreciso, ya que la medida se realiza con una carga hidráulica variable y el relleno con agua de los anillos puede provocar la suspensión de partículas sólidas y su posterior deposición y taponamiento de los poros del suelo. En definitiva, el número de anillos que puede controlar un individuo es limitado, lo que impide caracterizar la elevada variabilidad espacial inherente a este atributo. Para superar estas limitaciones y automatizar la medida se han desarrollado varios sistemas, aunque con un éxito limitado por razones prácticas (sistemas con cableado, con los inconvenientes que esto conlleva en campo; Matula y Dirksen, 1989; Maheshwari, 1996; De Luna *et al.*, 1999), técnicas (resolución insuficiente; Montserrat *et al.*, 1999), o económicas (sistemas de elevado coste unitario; Ankeny *et al.*, 1988; Prieksat *et al.*, 1992; Wu *et al.*, 1999).

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un nuevo sistema automatizado de medida de la infiltración en campo que cumpliera los requisitos de bajo coste, relativa simplicidad, y resolución suficiente para medir las bajas tasas de infiltración típicas de algunos suelos de la cuenca media del Ebro.

DESCRIPCIÓN Y COMPROBACIÓN DEL INFILTRÓMETRO AUTOMÁTICO (IA)

El sistema automatizado de medida de infiltración en campo o infiltrómetro automático (IA) ha sido desarrollado por la Unidad de Suelos y Riegos del SIA-DGA en colaboración con el Instituto Tecnológico de Aragón (ITA). El número total de unidades construidas fue de 18. Cada unidad está compuesta por un cilindro o anillo metálico simple conectado a un depósito de agua sobre el que reposa una caja que registra y almacena el descenso del nivel de agua en el depósito (Fig. 1).



Fig. 1.—Componentes principales del Infiltrómetro Automático para la medida de la infiltración del agua en el suelo en condiciones de campo



Fig. 2.—Anillo de infiltración con el sistema válvula-boya que mantiene un calado constante de agua

El anillo de infiltración (o anillo de Muntz) es un cilindro de hierro de 24 cm de diámetro y 40 cm de altura, con el contorno inferior biselado para facilitar su introducción en el suelo hasta una profundidad de unos 5 cm. En la parte superior interna de la pared lateral se instala un sistema válvula-boya (similar al existente en las cisternas de los inodoros) mediante el que se impone un calado o carga hidráulica constante de unos 10 cm (Fig. 2). La válvula se conecta mediante un tubo de goma a un depósito de agua de PVC, de 1 m de altura y 45 l de capacidad.

Conforme el agua contenida en el anillo infiltra en el suelo, el nivel de agua en el depósito disminuye. Este descenso se mide mediante una boya flotante conectada por medio de un hilo inelástico a una polea solidaria con un «encoder» o contador de pulsos instalado en la caja registradora colocada sobre el depósito (Fig. 3). El giro de la polea producido por el descenso de la boya conforme desciende el nivel de agua en el depósito es detectado por dicho «encoder», que genera 500 pulsos por cada vuelta completa de polea y contabiliza los pulsos producidos a lo largo del ensayo. La caja registradora contiene además un circuito electrónico que, entre otras funciones, almacena los pulsos medidos, y una batería recargable de 4 Ah que alimenta tanto al «encoder» como al circuito electrónico (Fig. 3).

A partir de los pulsos registrados y de la calibración del sistema (en la que, considerando el diámetro de la polea, se establece el número de pulsos que corresponden a un milímetro de altura de agua) se realiza la conversión automática de pulsos a mm de descenso del nivel de agua en el depósito. Los datos recogidos se almacenan en una memoria no volátil (memoria EPROM).



Fig. 3.—Caja registradora del descenso del nivel de agua en el depósito compuesta de una boya blanca que reposa sobre el agua del depósito, una polea (en gris) solidaria con el «encoder» (en azul), un circuito electrónico (en negro) y una batería (en gris claro)



Fig. 4.—Mando-registrador portátil con funciones de puesta en marcha y parada del sistema, almacenamiento de los datos de cada IA, y transferencia de los mismos al ordenador

El consumo total del sistema es de unos 30mA, por lo que la autonomía teórica de la batería es de unas 130 horas. Sin embargo, según la hoja de características del «encoder», su consumo es variable y puede llegar a duplicarse, lo que significa que la autonomía del sistema puede reducirse a la mitad. Este tiempo es suficientemente amplio para nuestros objetivos, ya que los ensayos de infiltración suelen durar unas pocas horas.

La puesta en marcha del sistema y la recogida de datos se realiza a través de un mando-registrador portátil diseñado a tales efectos (Fig. 4). El mando se comunica con el microprocesador mediante un enlace de infrarrojos, detecta automáticamente el número del IA (entre 1 y 18) del que se está recogiendo la información, almacena los datos y los transfiere a un ordenador mediante un puerto RS232. Estos datos son computados y visualizados mediante un programa desarrollado a tales efectos. Entre otras salidas, el programa proporciona para cada uno de los IA el tiempo acumulado y la infiltración acumulada, a partir de los cuales se calcula la evolución de la infiltración instantánea a lo largo del ensayo.

La comprobación del funcionamiento y el grado de precisión de cada uno de los 18 IA construidos se realizó comparando los valores computados con lecturas manuales. Para ello, se dispuso un depósito de agua con un orificio en su base al que se conectó un tubo de tygón transparente de 4 mm de diámetro interior adosado verticalmente a la pared exterior del depósito. El descenso del nivel de agua en dicho tubo se midió periódicamente con una regla milimetrada, y se comparó con el descenso computado por cada IA.

La Tabla 1 presenta las lecturas de infiltración acumulada (I , mm) computadas cada 15 min. de forma manual y con los 18 IA. La prueba de Kolmogorov-Smirnov (Canavos, 1993) para cada uno de los IA establece que no hay diferencias significativas, para un nivel de confianza del 95 %, entre los datos de infiltración acumulada obtenidas manual y automáticamente. Esto es, todos los infiltrómetros funcionaron correctamente, con unos errores de lectura ± 1 mm, que es la precisión exigida al equipo. La Figura 5 presenta los

Tabla 1

Puesta a punto de 18 infiltrómetros automáticos (IA N°): comparación de las infiltraciones acumuladas medidas cada 15 min. de forma manual y automática

IA N°	Tiempo (min)	Inf. Acumulada (mm)		IA N°	Tiempo (min)	Inf. Acumulada (mm)		IA N°	Tiempo (min)	Inf. Acumulada (mm)	
		Manual	Autom.			Manual	Autom.			Manual	Autom.
1	15	3	3,2	6	15	8	8,4	13	15	0	0
	30	35	34,4		30	17	17,7		30	0	0
	45	52	52,2		45	25	25,2		45	2	2,2
	60	77	77,3		60	43	42,9		60	8	8,5
	75	90	89,8		75	51	51		75	14	14
	90	106	106,2		90	71	71,3	14	15	14	14,1
	105	126	126,3	105	82	82,6	30		26	26,1	
	120	139	138,5	120	96	95,9	45		28	28,1	
	135	159	159,2	7	15	112	112,4		60	29	29,5
	150	171	171,3		30	189	189,2		75	32	31,7
2	15	0	0	7	45	252	252,7	90	33	33,5	
	30	0	0		60	309	308,9	105	36	35,8	
	45	2	2,2		75	360	359,6	120	38	38	
	60	8	8,5		90	407	407,6	135	39	39,1	
	75	14	14		105	454	453,8	150	42	42,4	
	90	20	19,9	8	15	12	12,5	15	15	0	0
	105	26	26,1		30	29	29,5		30	1	1,6
	120	33	32,1		45	40	40		45	2	1,8
	135	38	38		75	47	47,2		60	2	2,1
	150	44	43,5		90	55	54,9		75	3	2,5
3	15	16	15,8	9	15	4	3,9	16	90	3	3
	30	35	34,9		30	6	6,5		15	35	35,1
	45	52	52,6		45	8	8,4		30	51	50,8
	60	73	72		60	10	10		45	65	64,9
	75	87	87,5		75	12	11,6		60	81	81,1
	90	104	103	90	13	13,5	75	97	97		
	105	117	117,2	105	16	15,6	90	102	102,6		
	120	130	129,1	120	17	17	17	15	0	0	
	135	142	141,9	135	19	19,1		30	0	0,3	
	150	153	152,8	10	15	13		13,5	45	5	4,9
4	15	5	5,6		30	18		18,6	60	9	8,9
	30	17	16,7		45	21		21,2	75	13	13,6
	45	28	28,5		60	24	24,4	90	20	19,8	
	60	46	46,3		75	30	29,8	18	15	20	19,8
	75	61	60,7	90	35	34,9	30		25	24,9	
90	74	73,7	105	40	39,6	45	30		29,8		
105	90	89,6	120	44	44,1	60	34		33,7		
120	99	98,8	11	15	26	26,1	75		43	42,9	
135	110	110,3		30	43	43,2	90	54	53,8		
150	122	121,9		45	64	64,3	105	67	67,1		
5	15	30		30,2	60	80	80,2	12	15	35	34,3
	30	50		49,9	75	104	103,8		30	54	54,3
	45	76	75,8	12	15	35	34,3		45	75	75,4
	60	107	107,2		30	54	54,3		60	100	100,8
	75	128	128		45	75	75,4		75	126	126,2
	90	158	158,2		60	100	100,8	90	143	142,8	
	105	181	180,6		75	126	126,2	105	160	159,9	
	120	205	205,1	90	143	142,8					
	135	229	229,1	105	160	159,9					
	150	256	255,6								

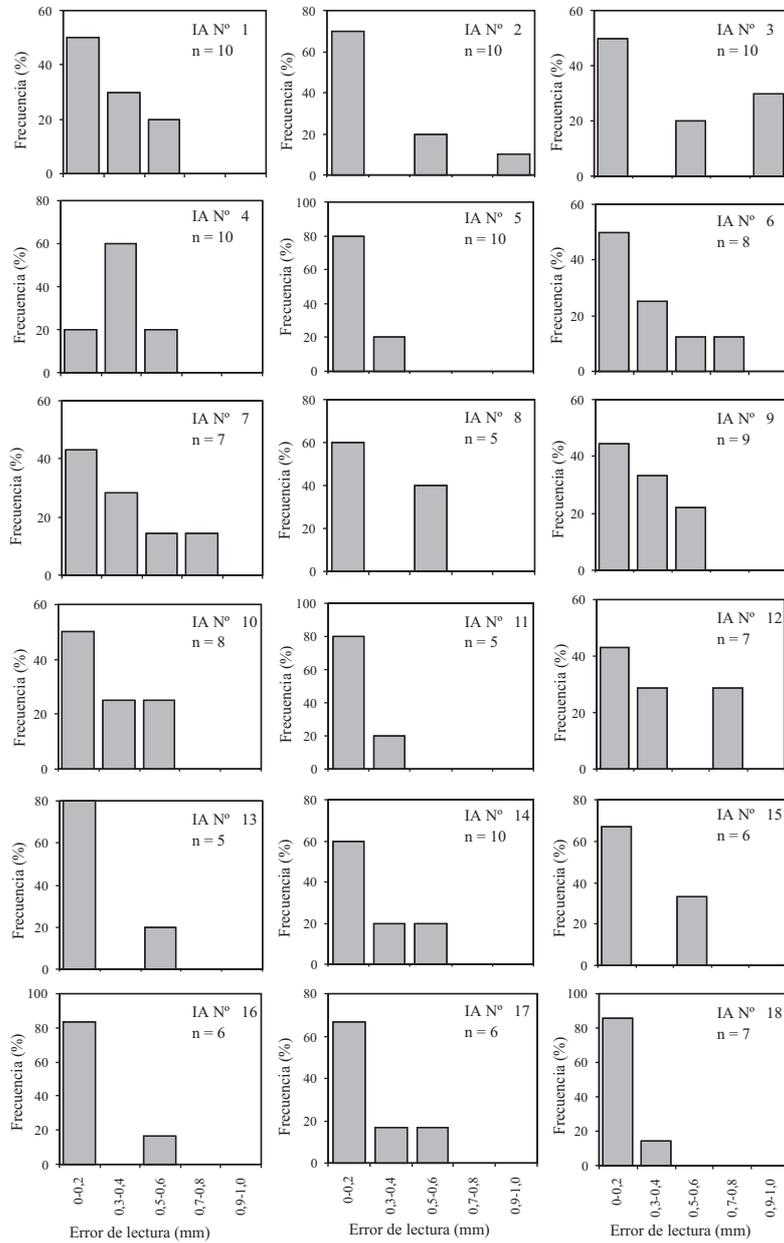


Fig. 5.—Histogramas de frecuencia (%) de los errores de lectura cometidos por los 18 IA al determinar la infiltración acumulada (mm); n corresponde al número de observaciones de cada IA

histogramas de frecuencia de los errores de lectura cometidos por los 18 IA respecto a las lecturas realizadas manualmente. Para el conjunto de los 18 IA, el 94 % de los errores fueron inferiores a 0,6 mm, por lo que se concluye que el IA es un instrumento excelente para la automatización de los ensayos de infiltración en condiciones de campo.

Finalmente, la Figura 6 presenta dos ejemplos de la información proporcionada por el IA: infiltración acumulada obtenida con seis IA en uno de los suelos estudiados (Grañén T1) y tasa de infiltración instantánea obtenida con cinco IA en otro de los suelos (Callén). En ambos casos se presentaron pequeñas oscilaciones de las observaciones individuales, alcanzándose a partir de unos 180 min. de duración del ensayo unas infiltraciones finales estabilizadas.

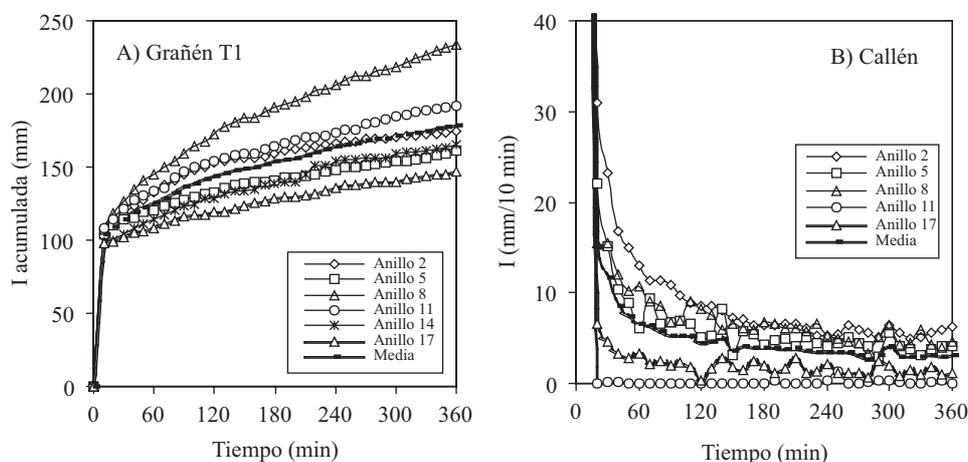


Fig. 6.—Ejemplo de la información proporcionada por los IA: A) Infiltración acumulada (I, mm) obtenida con 6 IA en los primeros 360 min. de ensayo en el suelo Grañén T1; B) Infiltración instantánea (I, mm/10 min) obtenida con 5 IA en los primeros 360 min. de ensayo en el suelo Callén

APLICACIÓN DEL INFILTRÓMETRO AUTOMÁTICO

El IA automático se utilizó para medir la infiltración de siete suelos de la cuenca media del Ebro situados en los sistemas de riegos de Bardenas I (1 suelo; CE agua de riego = $0,6 \text{ dS m}^{-1}$) y Monegros I (4 suelos; CE agua de riego $< 0,8 \text{ dS m}^{-1}$), y en la parcela lisiométrica de la finca experimental del SIA (1 suelo; CE agua de riego = $1,8 \text{ dS m}^{-1}$). En esta última parcela se realizaron medidas de infiltración en dos áreas diferentes, una en la que el suelo estaba desnudo y otra con un cultivo de festuca, por lo que en este trabajo se presentan como infiltración de «dos suelos».

En el caso de que el suelo estuviera encostrado, se determinaba la infiltración de la costra clavando el anillo en la misma. En puntos próximos a estas medidas se retiraban los primeros 5 cm del suelo y se procedía de nuevo a la medida de la infiltración del suelo

sin costra. El número de repeticiones en cada suelo osciló entre 4 y 6, siendo 49 el número total de ensayos de infiltración que se presentan en este trabajo.

La Tabla 2 presenta las características físico-químicas más importantes de estos suelos. Todos ellos son calcáreos, con contenidos de CaCO_3 del orden del 23-40 %. Dos suelos son salino-sódicos (Callén y Barbués 3/1), la parcela lisimétrica es salina y moderadamente sódica y el resto de suelos son no salinos-no sódicos. Dichos suelos presentan además ciertas características desfavorables, como el predominio de limo (cerca de un 50 %) y contenidos de materia orgánica relativamente bajos. La mineralogía de arcillas es predominantemente illítica (más del 70 % de las arcillas son micas) con un pequeño porcentaje de cloritas (5-20 % del total), caolinitas (< 5 %) y pirofilitas (< 5 %).

Tabla 2
Principales características físico-químicas de los suelos estudiados

Suelos	Extracto de saturación					Textura			Humedad				
	Prof.	HS	CE _e	pH _e	RAS _e	arena	limo	arcilla	Cc	Pm	MO	CaCO ₃	CIC
	cm	%	dS m ⁻¹	(mmol/L) ^{0.5}		%			%	%	%	%	meq/100g
Bardenas I													
SA-92/1	0-20	37	1,1	8,5	0,9	31,5	48,6	20,0	21,0	9,4	–	39,6	12,1
Monegros I													
Callen-olivos	0-25	55	9,8	–	13,9	–	–	–	–	–	–	–	–
Barbués 2/1	0-20	35	1,3	7,8	4,0	29,1	51,8	19,1	24,4	10,8	1,7	23,4	8,8
Barbués 3/1	0-20	34	6,1	8,0	13,6	30,0	52,6	17,4	22,2	11,5	1,4	25,8	5,2
Grañén T1	0-20	49	1,8	8,3	0,8	15,3	46,7	38,0	24,6	16,3	2,2	29,6	15,3
Campus SIA													
P.lisimétrica	0-20	33	5,6	7,7	6,2	14,5	52,7	32,7	–	–	1,8	33,3	–

Prof. = profundidad del horizonte analizado; HS = humedad de saturación; CE_e = conductividad eléctrica de la pasta saturada; pH_e = pH de la pasta saturada; RAS_e = relación de adsorción de sodio de la pasta saturada; Cc = capacidad de campo; Pm = punto de marchitez; MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico.

La Figura 7 presenta, para cada suelo, la evolución temporal de las tasas instantáneas medias de infiltración (I, mm/h) y las correspondientes desviaciones estándar.

Las tasas de infiltración disminuyeron con el tiempo hasta estabilizarse y alcanzar sus respectivas tasas características de infiltración final (IF). Esta reducción de la infiltración es inducida por el descenso del gradiente de potencial matricial del suelo conforme los suelos se humedecen en el proceso de lavado, pero también puede atribuirse en algunos casos a procesos de dispersión física y química del suelo. La Tabla 3 presenta los valores medios de la infiltración final (IF, mm/h) y sus coeficientes de variación (CV, %).

Los siete suelos estudiados (cinco suelos más el suelo de la parcela lisimétrica con y sin festuca) presentaron unos valores de I (Fig. 7) y de IF (Tabla 3) diferentes entre sí, y con una elevada variabilidad espacial (CV de los valores medios de IF entre 30 y 122 %), lo que es, en general, muy común en este tipo de medidas. De acuerdo a los valores absolutos de infiltración de los siete suelos sujetos a AC (agua de riego del canal respectivo) y considerando la clasificación de los suelos establecida por Landon (1984) (citada por Por-

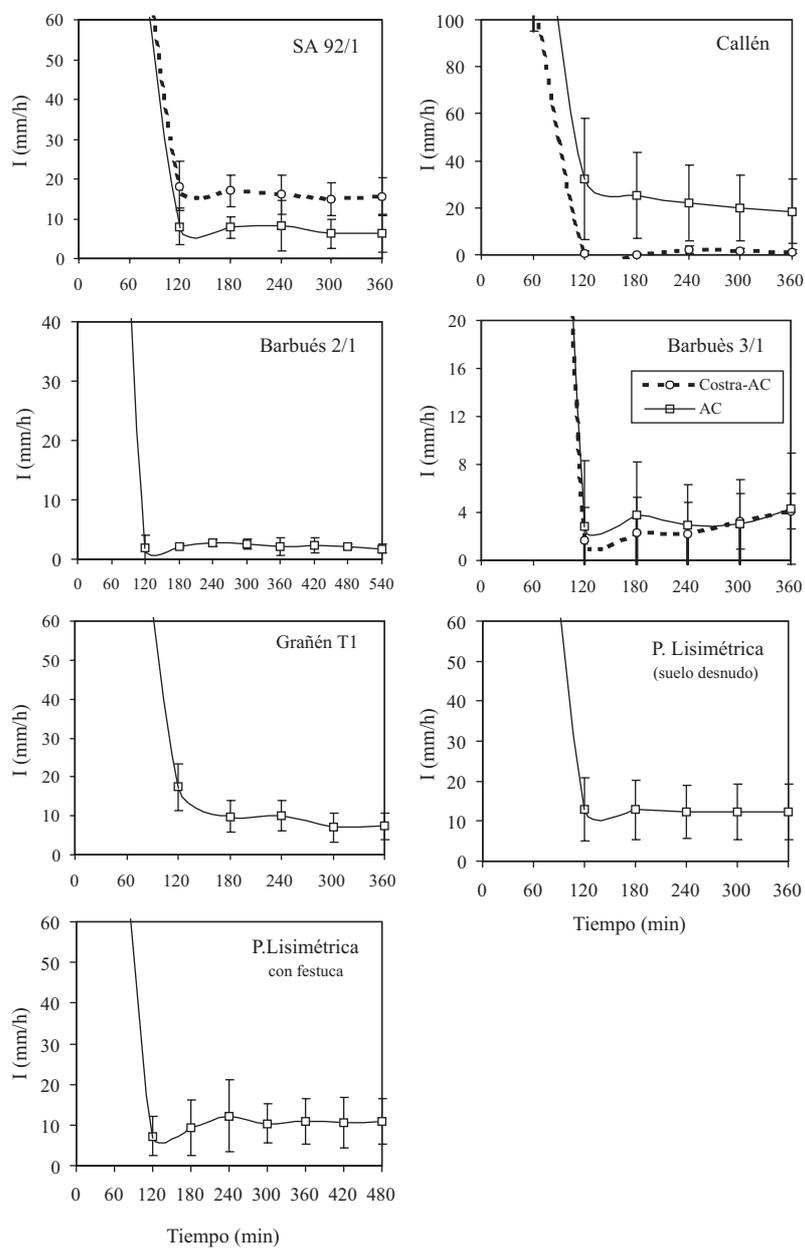


Fig. 7.—Tasas de infiltración (I, mm/h) de los 7 suelos y de sus costras sujetos a agua de riego del canal correspondiente (AC). Valores medios y desviaciones estándar calculadas a partir de 4, 5 ó 6 repeticiones

Tabla 3

Tasas medias de infiltración final estabilizada (IF, mm/h) medidas con 49 ensayos de IA en siete suelos sin costra y en tres de estos suelos con costra. Los valores de IF con la misma letra dentro de cada suelo no son significativamente diferentes ($P > 0,05$) según el test de Duncan

Suelos	Infiltración final (IF, mm/h)					
	IF sin costra			IF con costra		
	IF media	n	CV (%)	IF media	n	CV (%)
SA-92/1	6,4a	4	73	15,6b	4	30
Callén (olivos)	18,4a	5	75	1,3b	5	46
Barbués 2/1	1,8	5	40			
Barbués 3/1	3,6a	4	122	3,3a	4	52
Grañén T1	7,3	6	48			
Parcela lisimétrica (suelo desnudo)	12,4	6	56			
Parcela lisimétrica (suelo con festuca)	11,0	6	51			

ta *et al.*, 1994), se puede concluir que cinco de ellos (SA 92/1, Callén, Grañén T1 y P. Lisimétrica con y sin festuca) presentaron IFs moderadamente lentas (entre 18 y 6 mm/h) consideradas adecuadas para el riego por superficie, mientras que los dos suelos restantes (Barbués 2/1 y Barbués 3/1) presentaron IFs lentas (inferiores a 4 mm/h), consideradas muy bajas para el riego por superficie y con un riesgo elevado de encharcamiento, escorrentía y erosión.

Tres de los suelos estudiados (SA 92/1, Callén y Barbués 3/1) presentaban una costra superficial en el momento en que se realizaron los ensayos de infiltración. Generalmente, la baja conductividad hidráulica (CH) de las costras es la que determina la infiltración del agua en el suelo (Agassi *et al.*, 1981; Sumner y Stewart, 1992). Este fue el caso para el suelo Callén, cuya IF con costra fue catorce veces inferior a la del suelo sin costra (Tabla 3). Sin embargo, la IF del suelo Barbués 3/1 con y sin costra fue similar, lo que sugiere que la conductividad hidráulica (CH) de la costra no fue la que determinó su infiltración. Este suelo estaba muy compactado, su resistencia a la penetración (R_p) era muy elevada (valores medidos con penetrógrafo superiores a 500 N cm⁻²), y contenía un horizonte muy impermeable de lutitas a unos 30 cm de profundidad, que fue el que controló su infiltración, razón por la cual las IFs con y sin costra fueron idénticas y muy bajas (Tabla 3). Finalmente, la IF del tercer suelo (SA 92/1) fue dos veces y media superior con costra que sin costra (Tabla 3). Dicha costra era, sin embargo, muy frágil, porosa y poco consolidada, de tal manera que el valor de R_p fue inferior en superficie (primeros 5 cm de suelo) que en profundidad. La mayor IF del suelo encostrado podría atribuirse por lo tanto a la variabilidad espacial del suelo (ya se ha indicado que las medidas con y sin costra se efectuaban en áreas del suelo próximas, pero no coincidentes) y/o a posibles discontinuidades del perfil del suelo que afectan a los valores de infiltración (Wu *et al.*, 1997).

Las costras de los suelos Callén y Barbués 3/1 podrían haberse formado por la dispersión química de arcillas y el subsiguiente taponamiento casi total de los poros del suelo (va-

lores de IF de 1,3 y 3,3 mm/h, respectivamente), ya que ambos suelos son sódicos (Tabla 2) y muy susceptibles por lo tanto a la dispersión química inducida por aguas de baja salinidad como las del canal de Monegros o el agua de lluvia. Por el contrario, la costra del suelo no sódico SA 92/1 tendría un origen físico (probablemente inducido por el impacto de las gotas de lluvia), con un taponamiento de poros mucho menor que en los otros dos suelos y, por lo tanto, con una IF mucho más elevada (15,6 mm/h). Estos resultados limitados sugieren, tal como indicó Levy *et al.* (1986), que la estabilidad del sellado superficial depende del mecanismo de formación, siendo mucho más estable el sellado de origen químico que el de origen físico. Así, el secado del sellado físico puede conducir a costras agrietadas o friables que permiten recuperar en parte la capacidad de infiltración del suelo, mientras que el secado del sellado químico suele conducir a costras duras y compactas de elevada estabilidad que reducen de forma irreversible la infiltración del agua en el suelo.

Finalmente, aunque el suelo Callén presenta el valor más elevado de infiltración si se elimina la costra (IF = 18,4 mm/h), hay que resaltar que es un suelo muy inestable e impermeable, puesto que es muy susceptible al encostramiento y la costra formada es extremadamente compacta.

SUMMARY

Development of an automated infiltrometer and its applicability to the field

Quantification of water infiltration is of great interest for the design of efficient irrigation systems, in environmental studies, in the determination of soil erosion, in the analysis of soil crusting susceptibility and for the reclamation of salt-affected soils. The classic methods for measuring soil infiltration rates (IR) are tedious, inaccurate and time consuming. Therefore, studies reporting the characterization of spatial variability by simultaneously measurements at multiple sites are not frequent in the literature. As a result, new automated, fast and accurate methods are required. This paper presents the development of a new automated single-ring infiltrometer and its applicability for determining the infiltration rates of seven soils of the Middle Ebro Basin. Eighteen infiltrometers were built and set-up. The accuracy of water depth measurements was very high: 94 % of the errors between the computed and the manually collected values were lower than 0.6 mm, and 100 % were lower than 1 mm. Five soils had moderately slow final infiltration rates (FIR), ranging between 18 and 6 mm h⁻¹, considered adequate for surface irrigation, while the two other soils had slow FIR (< 4mm h⁻¹), considered insufficient for surface irrigation and with a high risk for water logging, runoff and erosion. The FIR for each of the seven soils exhibited a very high spatial variability (CV between 30 and 122 %). Infiltration in these soils is affected by surface crusting, the chemical or physical origin of the crusts and the low permeability of some of the sub-surface horizons. The general conclusion of this work is that the new automated single-ring infiltrometer is an excellent tool for field quantification of water infiltration into the soil.

Key words: infiltration, soil crusting, chemical dispersion, physical dispersion

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGASSI M., SHAINBERG I., MORIN J., 1981. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 848-851.
- ANGULO-JARAMILLO R., VANDERVAERE J.P., ROULIER S., THONY J.L., GAUDET J.P., VAUCLIN M., 2000. Field measurements of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers. A review and recent developments. *Soil & Till. Res.* 55, 1-29.
- ANKENY M.D., KASPAR T.C., HORTON R., 1988. Design for an automated tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 893-896.

- BOUWER H., 1986. Intake rate: Cylinder infiltrometer. En: Methods of soil analysis. Klute, A., ed. Part I. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA, SSSA, Madison, WI, pp. 825-844.
- CANAVOS G.C., 1993. Probabilidad y Estadística: Aplicaciones y métodos. McGraw-Hill-Interamericana de México. S.A. de C.V. 651 pp.
- DE LUNA ARMENTEROS E., AGUILAR TORRES M.A., LLANOS TRIVIÑO I., 1999. Riegos y Drenajes XXI 108, 37-41.
- LEVY G., SHAINBERG I., MORIN J., 1986. Factors affecting the stability of soil crusts in subsequent storms. Soil Sci. Soc. Am. J. 50, 196-201.
- MAHESHWARI B.L., 1996. Development of an automated double-ring infiltrometer. Aust. J. Soil Res. 34, 709-714.
- MATULA S., DIRKSEN C., 1989. Automated regulating and recording system for cylinder infiltrometers. Soil Sci. Soc. Am. J. 53, 299-302.
- MONSERRAT J., CASALI J., VILARÓ J., BARRAGÁN J., 1999. Ensayos de contraste de una sonda de ultrasonidos para la medida de altura de agua. Riegos y Drenajes XXI 104, 54-56.
- PORTA J., LÓPEZ-ACEVEDO M., ROQUERO C., 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 1.^a ed. Mundi-Prensa. 807 pp.
- PRIEKSAT M.A., ANKENY M.D., KASPAR T.C., 1992. Design for an automated, self-regulating, single-ring infiltrometer. Soil Sci. Soc. Am. J. 56, 1409-1411.
- REYNOLDS W.D., ELRICK D.E., 1990. Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. Soil Sci. Soc. Am. J. 54, 1233-1241.
- SUMNER M.E., STEWART B.A., 1992. Soil crusting: Chemical and physical processes. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida. 372 pp.
- WANG D., YATES S.R., LOWERY B., VAN GENUCHTEN M. Th., 1998. Estimating soil hydraulic properties using tension infiltrometers with varying disk diameters. Soil Sci. 163, 356-361.
- WU L., PAN L., MITCHELL J., SANDEN B., 1999. Measuring saturated hydraulic conductivity using a generalized solution for single-ring infiltrometers. Soil Sci. Soc. Am. J. 63, 788-792.
- WU L., PAN L., ROBERSON M.J., SHOUSE P.J., 1997. Numerical evaluation of ring-infiltrometers under various soil conditions. Soil Sci. 162, 771-777.