

ANÁLISIS DE CURVAS DE INFILTRACIÓN 3D MEDIDAS CON INFILTRÓMETRO DE DISCO EN PERFILES DE SUELO HETEROGÉNEOS: ANÁLISIS SECUENCIAL DE LA CURVA INFILTRACIÓN

D. Moret-Fernández y B. Latorre

¹Departamento de Suelo y Agua. Estación Experimental de Aula Dei, CSIC., Avda. Montañana 1.005, 50059 Zaragoza. e-mail: david@eead.csic.es

RESUMEN. Utilizando la ecuación de infiltración de cuatro términos, este trabajo estima la sorptividad, S y conductividad hidráulica K_s en suelos estratificados utilizando un Análisis Secuencial de curva de Infiltración (SIA). Sobre una secuencia de tiempos crecientes, SIA estima S , K_s y el error cuadrático medio, RMSE, donde el tiempo óptimo de infiltración se corresponde con el mínimo RMSE. El método se aplicó en suelo franco sintético y cuatro perfiles estratificados de suelo franco de 1 y 3 cm de espesor dispuesto sobre un suelo limoso y arenoso-franco, respectivamente, y en 10 suelos experimentales. Las estimaciones de S y K_s mejoraron tras aplicar el método SIA, donde el RMSE aumenta cuando el frente de humectación alcanza el límite inferior de la capa superficial del suelo. Este incremento del RMSE permite detectar el tiempo óptimo de infiltración, el grado de heterogeneidad del suelo, y mejorar la estimación de S y K_s de la capa superior del suelo.

ABSTRACT. Making use of the four-term infiltration equation, this work estimates sorptivity, S , and hydraulic conductivity, K_s , in stratified soils using a Sequential Infiltration curve Analysis (SIA). On an increasing infiltration time sequence, SIA estimates S , K_s and the root mean square error, RMSE, where the optimal infiltration time corresponds to the minimum RMSE. The method was applied on synthetic loam soil and four stratified profiles of 1 and 3 cm thickness loam layer laid on a silt and sandyloam soils, respectively, and on 10 experimental soils. The estimates of S and K_s improved after applying the SIA method, where the RMSE increases when the wetting front reaches the lower limit of the top soil layer. This increase in RMSE allows detecting the optimal infiltration time, the degree of soil heterogeneity, and improving the estimate of S and K_s of the upper soil layer.

1.- Introducción

Las medidas de las propiedades hidráulicas de la superficie del suelo son cruciales para afrontar problemas ambientales e hidrológicos relacionados con el almacenamiento y transporte del agua del suelo en la zona no saturada. El infiltrómetro de disco (Perroux y White, 1988) es una herramienta ampliamente utilizada para medir in situ de las propiedades hidráulicas del suelo (Angulo-Jaramillo et al., 2000). Este instrumento consiste en una base circular o disco unido a un depósito de agua y una torre de burbujeo que permite imponer una carga de presión negativa (h) en la base del disco (Perroux y White, 1988).

Las propiedades hidráulicas del suelo, sorptividad (S) y conductividad hidráulica (K_s), se calculan a partir de la curva de infiltración acumulada medida con el infiltrómetro de disco.

Entre los diferentes modelos de flujo transitorio para estimar S y K_s , tenemos la ecuación implícita (QEI) de Haverkamp et al. (1994), que depende de los siguientes parámetros: K_s , S , el radio del disco, r_d , las constantes β y γ , y los contenidos volumétricos de agua inicial, θ_i , y final, θ_s (Haverkamp et al., 1994; Smettem et al., 1994). Para condiciones normales de suelo se utilizan valores constantes de β y γ igual a 0,6 y 0,75, respectivamente (Angulo-Jaramillo et al., 2019; Lassabatere et al. 2009).

Con el fin de simplificar los cálculos, Haverkamp et al. (1994) propuso estimar K_s y S , utilizando la aproximación simplificada de dos términos (2T), válida solo para tiempos de infiltración cortos a intermedios. Aunque este modelo ha sido ampliamente utilizado (Vandervaere et al., 2000; Lassabatere et al., 2006; Moret-Fernández et al., 2013), su reducido tiempo de validez puede restringir su aplicación. Para resolver esta limitación, Latorre et al. (2015) propusieron determinar las propiedades hidráulicas del suelo a partir del análisis inverso del modelo QEI. Sin embargo, dada la complejidad de esta ecuación, Moret-Fernández et al. (2020) propusieron estimar K_s y S utilizando aproximaciones de QEI de tres (3T) y cuatro términos (4T), que al incorporar más términos, permiten alargar los tiempos de infiltración. Aunque los cuatro grados de libertad disponibles por 4T permiten, en teoría, estimar los cuatro parámetros del modelo de Haverkamp et al. (1994) (K_s , S , γ y β), estos mismos autores observaron que la inversión numérica sobre curvas de infiltración medidas en suelo con capa de arena de contacto se veía afectada por problemas de equifinalidad y no unicidad, por lo cual concluyeron que se requerían utilizar valores constantes de γ y β .

La mayoría de los modelos de infiltración de agua en el suelo asumen medios porosos isotrópicos y homogéneos. Sin embargo, la heterogeneidad del suelo en el campo es más bien una regla que una excepción, lo cual puede tener gran impacto sobre las curvas de infiltración (Lassabatere et al., 2014; Angulo-Jaramillo et al., 2019). Por ejemplo, se pueden obtener curvas de infiltración de doble pendiente, en caso de presencia de fenómenos de hidrofobicidad (Lassabatere et al., 2019), o curvas de infiltración con extraconcavidad debido al sellado del suelo y la concomitancia de varias capas (Di Prima et al., 2018). En estos casos, la aplicación de modelos basados en la uniformidad del suelo puede llevar a estimaciones erróneas de las propiedades hidráulicas (Angulo-Jaramillo et al., 2019).

Dada la escasa información sobre el comportamiento

de los modelos de infiltración en suelos no uniformes o estratificados, el objetivo de este trabajo es presentar un nuevo método, Análisis Secuencial de curva de Infiltración (SIA), para estimar K_s y S a partir del análisis inverso de una curva de infiltración medida en perfiles de suelo estratificado utilizando el modelo de infiltración 4T. El procedimiento consiste en un análisis secuencial de curvas de infiltración de tiempo creciente en los que se determina la evolución de la calidad del ajuste o RMSE. El mejor ajuste, caracterizado por el RMSE mínimo, determina el tiempo óptimo de infiltración a partir del cual se estiman los valores K_s y S de la capa superior del suelo. El método SIA fue validado sobre curvas de infiltración generadas en perfiles sintéticas de suelo homogéneos y estratificados y posteriormente aplicado sobre curvas de infiltración experimentales.

2.- Teoría

2.1. Ecuaciones de la curva de infiltración acumulada

El modelo 3D de infiltración acumulada, I_{3D} , (QEI) para medidas con infiltrómetro de disco correspondiente a condiciones finales saturadas puede describirse según (Haverkamp et al., 1994; Smettem et al. 1994)

$$\frac{2(K_s - K_i)^2}{S^2} t = \frac{2}{1-\beta} \frac{(K_s - K_i)(I_{3D} + (A - K_i)t)}{S^2} - \frac{1}{1-\beta} \ln \left[\frac{1}{\beta} \exp(2\beta(K_s - K_i)(I_{3D} + (A - K_i)t)/S^2) + \frac{\beta-1}{\beta} \right] \quad (1)$$

donde t es el tiempo (T), S es la sorptividad ($LT^{-0.5}$), K_s y K_i (LT^{-1}) son los valores de conductividad hidráulica para contenido volumétrico de agua a saturación, θ_s e inicial, θ_i , (L^3L^{-3}), respectivamente, β es una constante y $A = \frac{\gamma S^2}{r_d(\theta_s - \theta_i)}$, donde γ es una constante de proporcionalidad y r_d el radio del disco. El valor de β varía entre 0,6 y 1,7 (Lassabatere et al., 2009) y el del γ entre 0,6 y 0,8 (Haverkamp et al., 1994). La aplicación de la serie de Taylor al modelo QEI 3D hasta el cuarto orden en potencias de $t^{1/2}$ resulta (Moret-Fernández et al., 2020):

$$I_{3D_4T}(t) = S t^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{2-\beta}{3} K_s + A S^2 \right) t + \frac{K_s^2}{9S} (\beta^2 - \beta + 1) t^{\frac{3}{2}} + 2(\beta - 2)(\beta 1) \frac{(1-2\beta) K_s^3}{135 S^2} t^2 \quad (2)$$

Aunque la ecuación 4T permite potencialmente determinar los cuatro parámetros S , K_s , β y A , Moret-Fernández et al. (2020) demostraron que los parámetros A y β deben considerarse fijos en medidas de curva de infiltración realizadas en suelos con capa de arena de contacto.

2.2. Análisis secuencial de la curva de infiltración (SIA)

Utilizando el modelo 4T (Ec. 2), el procedimiento SIA implica un análisis sobre una secuencia temporal creciente de curvas de infiltración y estima S , K_s el RMSE para cada sección de curva. El tiempo de infiltración óptimo, t_o , se

identifica por el mínimo RMSE, y su inversión correspondiente proporciona las estimaciones de K_s y S . Se consideraron un total de 30 tiempos crecientes que variaron desde 50s hasta el tiempo total de la curva de infiltración. El análisis inverso con 4T se realizó utilizando el método de mínimos cuadrados no lineal (ponderado) que incorpora el algoritmo de ajuste de Levenberg-Marquardt. El procedimiento se implementó en una función que devuelve un vector de residuos (ponderados) que minimiza la suma de cuadrados (More, 1978; Bates y Watts, 1988; Bates y Chambers, 1992). Para ello, se utilizó el software R (R versión 3.5.0. The R Foundation for Statistical Computing). En todos los casos, los valores de γ y β se fijaron a 0,75 y 0,6 respectivamente.

3.- Material y métodos

3.1. Validación del método SIA con suelos sintéticos

Utilizando el modelo HYDRUS-3D (Šimunek et al., 1999) se simuló curvas de infiltración sobre las funciones hidráulicas de van Genuchten (1980) para suelos arenoso-franco, franco y limoso (Carsel y Parrish, 1988) (Tabla 1). El volumen de suelo se discretizó como un cilindro (25 cm de radio y 25 cm de profundidad), cubriendo el plano axisimétrico con una malla rectangular 2D de 100 x 900 celdas. La base del infiltrómetro de disco de 10 cm de radio se representó mediante un límite de presión de agua fijo a 0 cm. Se consideró una carga de presión nula el límite inferior de la columna. El contenido inicial de agua del suelo se correspondió a su contenido de agua residual. Se simuló una infiltración acumulada de 2000 s, comprobando que este tiempo fue suficiente para que el frente de humectación no alcanzara el límite inferior de la columna. No se definió capa de arena de contacto. Se realizaron simulaciones en suelo franco (L) homogéneo y perfiles estratificados de suelo consistentes una capa superficial de suelo franco de 1 y 3 cm de espesor sobre un suelo sintético arenoso-franco (L-SL) o limoso (L-Si), respectivamente.

Tabla 1. Valores de contenido volumétrico de agua inicial, θ_i , residual, θ_r , y saturación, θ_s , conductividad hidráulica saturada, K_s , y parámetros α y n del modelo de van Genuchten (1980) para suelos sintéticos arenoso-franco, franco y limoso.

Suelo	θ_s cm ³ cm ⁻³	θ_i, θ_r cm ³ cm ⁻³	α cm ⁻³	n	K_s cm s ⁻¹
Arenoso-franco	0.41	0.065	0.075	1.89	1.23 10 ⁻³
Franco	0.43	0.078	0.036	1.56	2.88 10 ⁻⁴
Limoso	0.46	0.034	0.016	1.37	6.94 10 ⁻⁵

3.2. Medidas de campo

Las medidas de infiltración se realizaron en campos agropastorales ubicados en el municipio de Mediana de Aragón (M1) (41°25'N, 0°44'W), en la provincia de Zaragoza de Aragón (NE España). La temperatura media anual y la precipitación son 14,9 °C y 350 mm año⁻¹, respectivamente. La litología está compuesta

principalmente por afloramientos de yeso, y los suelos, de textura franco arenosa a franco, alto contenido de yeso (entre 680 y 940 g kg⁻¹) y bajo contenido de materia orgánica (entre 9 a 48 g kg⁻¹), están poco desarrollados (Navas, 1991). Las infiltraciones de campo se realizaron sobre suelos desnudos (R1) y suelos bajo plantas (R2). Se tomaron muestras de suelo inalterados de 50 mm de diámetro y 50 mm de altura cerca de los puntos de infiltración. La θ_s se midió saturando el núcleo del suelo y posteriormente secándolo a 50 °C durante 48 h. El contenido de agua volumétrico inicial, θ_i , se midió con una sonda de humedad DeltaT. Se realizó una réplica de θ_s y θ_i por punto de muestreo y se utilizó un infiltrómetro de disco de 10 cm de diámetro. Se colocó una capa (<1 cm de espesor) de arena (tamaño de grano 80-160 μ m) entre la base del disco y la superficie del suelo. La duración de los experimentos varió entre 500 y 1800 s. Se registró un total de 10 curvas de infiltración acumulada. La influencia de la capa de arena de contacto (t_{sand}) para las estimaciones de K_s y S se eliminó utilizando el procedimiento de Latorre et al. (2015). Finalmente, S , K_s , t_o y el RMSE fueron con el método SIA.

4.- Resultados y discusión

4.1. Suelos sintéticos

Excepto para los primeros tiempos de infiltración, las estimaciones de S y K_s para el suelo franco homogéneo (L) fueron constantes a lo largo de todo el experimento (Fig. 1). Estas divergencias iniciales podrían atribuirse al gran salto de tensión al inicio del experimento, que cambia de -10^{-3} a -10^7 cm, y que posiblemente afectó a la estabilidad numérica de las infiltraciones simuladas. Aparte de esta variación inicial, las estimaciones de S y K_s se mantienen casi constantes a lo largo del experimento. Este resultado indica que, en condiciones de suelo homogéneo, el tiempo de infiltración no afecta a las predicciones de los parámetros hidráulicos. Por otro lado, la ligera disminución del RMSE con respecto al tiempo, indica que este parámetro puede ser un buen indicador de heterogeneidad del suelo.

Este comportamiento en suelos homogéneos contrasta con los observados en suelos estratificados, donde el RMSE comienza a aumentar cuando el bulbo de infiltración alcanza el límite inferior de la capa superficial del suelo (Fig. 1b), momento a partir del cual S y K_s comenzaron a desviarse de sus valores teóricos (Fig. 1c y d). Estos resultados indican que el método SIA permite detectar la heterogeneidad del suelo e identificar el tiempo de infiltración máximo para estimar S y K_s de la capa superficial del suelo. Por el contrario, se observaron estimaciones erróneas de propiedades hidráulicas cuando el modelo 4T fue aplicado a toda la curva de infiltración (Fig. 1c y d). Por ejemplo, este es el caso del suelo L_{1cm} + Si, donde el análisis a tiempo largo da valores de K_s inferiores a su valor teórico. Para el suelo sintético L_{1cm} + SL, se observaron también estimaciones erróneas de K_s a tiempos largos de infiltración. En conclusión, estos resultados

indican que el tiempo de infiltración es un factor importante para estimar las propiedades hidráulicas en perfiles de suelo heterogéneos.

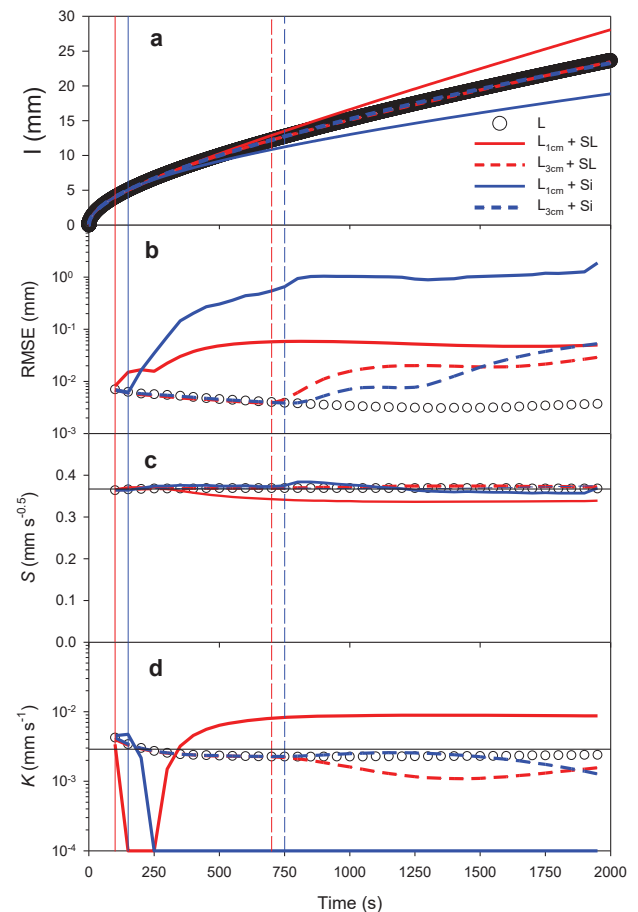


Fig. 1. (a) Curvas de infiltración acumulada simuladas en un suelo franco homogéneo (L) y capa suelo franco de 1 y 3 cm de espesor seguidas de una capa de suelo arenoso-franco (SL) y limoso (Si), y la evolución temporal del (b) RMSE, (c) sorptividad del suelo, S , y (d) conductividad hidráulica saturada, K_s . Las líneas verticales indican el tiempo óptimo, t_o , correspondiente al RMSE mínimo, y las líneas horizontales en (c) y (d) indican los valores teóricos de S y K_s , respectivamente.

4.2. Medidas de campo

Teniendo en cuenta los diferentes tipos de curvas de infiltración acumulada descritas por Angulo-Jaramillo et al. (2019), consideraremos los siguientes ejemplos: (i) una curva de infiltración regular (Fig.2a), (ii) una curva con extraconcavidad (Fig.2b), (iii) una con doble pendiente, previa comprobación que estaba afectada por fenómenos de hidrofobicidad (Fig. 2c), y (iv) infiltración con irregularidades a tiempos cortos (Fig. 2d).

En el primer caso (M1M2R2, Fig. 2a), la curva corresponde al de un suelo homogéneo, donde el RMSE disminuye a lo largo de todo el experimento (> 600 s).

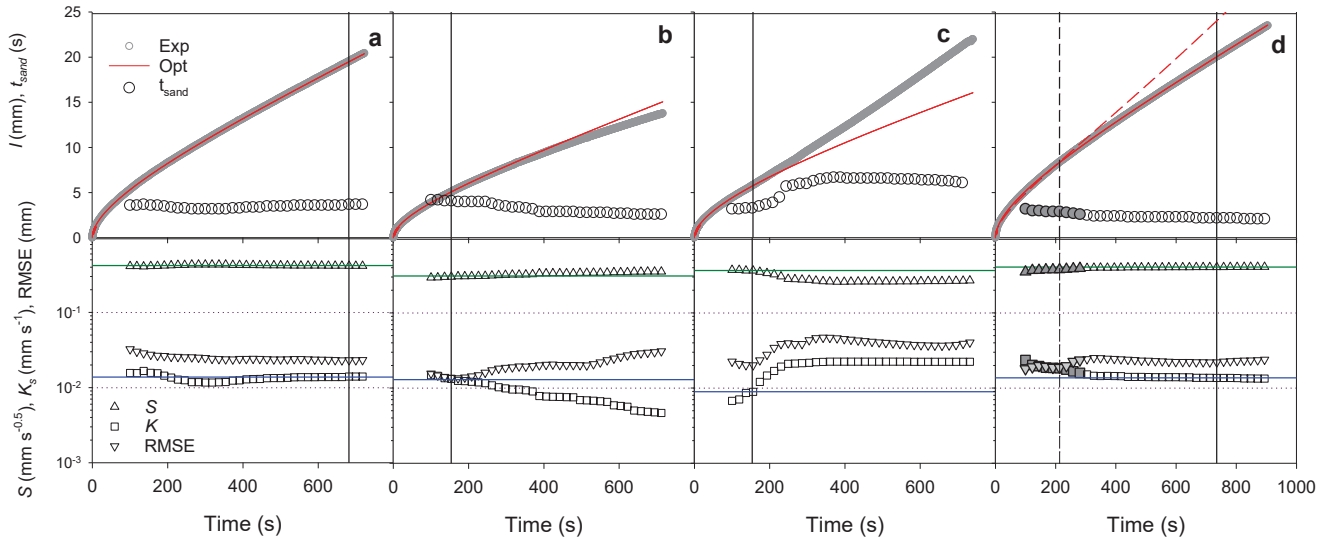


Fig. 2. Curvas de infiltración acumulada medida (Exp) y optimizada (Opt), y evolución temporal de la capa de arena de contacto, t_{sand} , RMSE, sorptividad del suelo, S , y conductividad hidráulica saturada, K_s , para los puntos de muestreo (a) M1M2R2, (b) M1L5R1, (c) M1L3R1 y (d) M1M2R1. Las líneas verticales indican el tiempo óptimo, t_o , de las simulaciones y las líneas horizontales azul y verde son los valores óptimos correspondientes de K_s y S , respectivamente.

Tabla 2. Contenido volumétrico de agua inicial / residual (θ_r / θ_r) y saturada (θ_s), tiempo total de infiltración (t_t) y tiempo óptimo de infiltración (t_o), sorptividad (S) y conductividad hidráulica saturada (K_s) estimada con 4T a partir de medidas de campo con infiltrómetro de disco.

	θ_r / θ_r		θ_s	t_t	t_o	S	K_s
	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$						
				s		$\text{mm s}^{-0.5}$	mm s^{-1}
M1L2R1	0.03	0.38		837	100	0.27	$2.71 \cdot 10^{-03}$
M1L2R2	0.02	0.41		779	297	0.25	$1.15 \cdot 10^{-02}$
M1L3R1	0.02	0.50		743	156	0.37	$8.92 \cdot 10^{-03}$
M1L3R2	0.04	0.51		898	145	0.03	$5.38 \cdot 10^{-03}$
M1L5R1	0.03	0.45		720	172	0.31	$1.25 \cdot 10^{-02}$
M1L5R2	0.02	0.55		648	149	0.24	$1.53 \cdot 10^{-02}$
M1M1R1	0.04	0.42		842	163	0.20	$9.14 \cdot 10^{-03}$
M1M1R2	0.02	0.48		597	593	0.52	$2.89 \cdot 10^{-02}$
M1M2R1	0.04	0.50		907	708	0.41	$1.38 \cdot 10^{-02}$
M1M2R2	0.04	0.41		727	663	0.42	$1.39 \cdot 10^{-02}$

Otros indicadores que corroboran la homogeneidad de este suelo fueron la estabilidad en las estimaciones de S y K_s y el valor casi constante de t_{sand} . Estos resultados sugieren que el perfil del suelo correspondiente a esta curva de infiltración fue homogéneo.

En el segundo ejemplo (M1L5R1, Fig. 2b), aunque un análisis visual preliminar podría sugerir un comportamiento similar a la curva anterior, el análisis secuencial evidenció la existencia de un perfil de suelo no uniforme dentro del tiempo de infiltración medido. El comportamiento decreciente de la tasa de infiltración, que corresponde a una especie de extraconcavidad (Angulo-Jaramillo et al., 2019), fue similar al observado en el suelo sintético $L_{1\text{cm}} + \text{Si}$ (Fig. 1b). El RMSE mínimo se ubicó entorno a los 170 s (a), tiempo a partir del cual éste comenzó a aumentar hasta el final de la infiltración. Otro indicador de la existencia de un perfil estratificado fue la disminución de K_s y la gran variación de t_{sand} a partir de t_o . Esta variación de t_{sand} se debe a que el modelo tuvo que adaptar el valor de t_{sand} para

encontrar el mejor ajuste a este perfil heterogéneo. Por otro lado, la disminución de K_s a lo largo del tiempo indica que el perfil presenta una capa profunda menos permeable (Di Prima et al., 2018). Aunque menos evidentes, estos cambios también se manifestaron en S , cuyos valores se mantuvieron casi constantes hasta los 170 s, tiempo a partir del cual empezó a aumentar.

La Fig. 4c (M1L3R1) muestra un comportamiento diferente, donde se observó un punto de inflexión entorno de los 150 s. Este comportamiento es debido a fenómenos de repelencia al agua (Moret-Fernández et al., 2019), tal como demostró la aplicación del método de la gota de agua (WDPT) (Watson y Letey, 1970). En suelo hidrófobos, el avance del bulbo de humectación durante su fase inicial se ve impedido por las capas hidrófobas que rodean los agregados del suelo (Jarvis et al., 2008). Sin embargo, una vez se desvanece la hidrofobicidad, se produce un aumento de la infiltración que provoca un incremento significativo del RMSE y K_s , y una disminución de S . También se

observó un incremento importante de t_{sand} justo antes del punto de inflexión. Aunque la repelencia al agua, y por ende el punto de inflexión, puede detectarse visualmente (Angulo-Jaramillo et al., 2019), el mínimo RMSE localizado con el método SIA permite una determinación más objetiva de valor t_o , y por lo tanto, estimaciones más precisas de S y K_s .

En el último ejemplo (M1M2R1, Fig. 2d), se presenta una curva con un análisis poco claro. En este caso, si la determinación de t_o se basa únicamente en el mínimo absoluto de RMSE, su valor se encuentra entorno a los 210 s (línea vertical discontinua). Sin embargo, un análisis más detallado indica que después del mínimo absoluto existe otro mínimo local que coincide con valores de t_{sand} , S y K_s más estables. Dado que la dispersión de todas las variables con el tiempo es relativamente pequeña, en este caso sugerimos omitir los tiempos iniciales (puntos grises en la Fig. 2d) y analizar la sección de infiltración restante. En este caso, t_o aumentó hasta 680 s (Tabla 2).

Todos estos ejemplos demostraron que el método SIA puede aplicarse a datos experimentales y habría que aplicarlo cuando se requieren estimaciones precisas de propiedades hidráulicas. Las estimaciones S y K_s efectuadas en las 10 medidas experimentales varían entre 0.03 a 0.52 mm s^{-0.5} y 2.7 10⁻³ a 1.5 10⁻² mm s⁻¹, respectivamente. De entre las 10 infiltraciones experimentales, solo 3 medidas presentaron un t_o similar al tiempo de infiltración total (≈ 600 s); el 10% presentaron $200 < t_o < 400$, y el 60% restante $t_o < 200$ s. Estos resultados indican que en la mayoría de los casos las propiedades hidráulicas se estimaron a partir de tiempos de infiltración cortos a medios.

5.- Conclusiones

Este trabajo presenta un procedimiento para analizar las curvas de infiltración medidas en perfiles de suelo estratificados. Este nuevo método, SIA, Sequential Infiltration Analysis, consiste en analizar las curvas de infiltración a intervalos de tiempo crecientes y calcular las correspondientes K_s , S y el RMSE caracterizando la calidad del ajuste, utilizando para ello el modelo 4T. El procedimiento, que se aplicó sobre perfiles estratificados sintéticos y suelos experimentales, mostró estimaciones erróneas de K_s y S cuando el análisis se aplica a toda la curva de infiltración obtenida en perfiles heterogéneos. Esta limitación, sin embargo, desaparece con el procedimiento SIA, que permite estimaciones satisfactorias de K_s y S . En la mayoría de los suelos experimentales, sólo se pudieron analizar tiempos de infiltración cortos a medios. En conclusión, estos resultados muestran que hay que tener precaución al calcular las propiedades hidráulicas del suelo a partir del análisis inverso de las curvas de infiltración.

Agradecimientos. Esta investigación fue financiada por el proyecto MITECO PROPAST (CGL2016-80783-R) y ASBIO (PGC2018-094332-B-I00). Los autores agradecen al Área de Informática Científica de la SGA (CSIC) su apoyo técnico en el análisis numérico.

6.- Bibliografía

- Angulo-Jaramillo, R., V. Bagarello, S. Di Prima, A. Gosset, M. Iovino, y L. Lassabatere. 2019. Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters (BEST) across soils and scales. *J. Hydrol.* 576, 239–261.
- Angulo-Jaramillo, R., J.P. Vandervaere, S. Roulier, J.L. Thony, J.P. Gaudet, y M. Vauclin, M. 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers. A review and recent developments. *Soil Till. Res.* 55, 1–29.
- Bates, D.M., y D.G. Watts. 1988. *Nonlinear Regression Analysis and Its Applications*, Wiley.
- Bates, D.M., y J.M. Chambers. 1992. *Nonlinear models*. Chapter 10 of *Statistical Models in S* eds J. M. Chambers and T. J. Hastie, Wadsworth & Brooks/Cole.
- Carsel, R.F., y R.S. Parrish. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* 24, 755–769.
- Di Prima, S., P. Concialdi, L. Lassabatere, R. Angulo-Jaramillo, M. Pirastru, A. Cerdà, y S. Keesstra. 2018. Laboratory testing of Beerkan infiltration experiments for assessing the role of soil sealing on water infiltration. *Catena* 167, 373–384.
- Haverkamp, R., P.J. Ross, K.R.J. Smettem, y J.Y. Parlange. 1994. Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. Part 2. Physically based infiltration equation. *Water Resour. Res.* 2931–2935.
- Jarvis, N., A. Etana, y F. Stagnitti. 2008. Water repellency, near-saturated infiltration and preferential solute transport in a macroporous clay soil. *Geoderma* 143, 223–230.
- Lassabatere, L., S., Di Prima, R., Angulo-Jaramillo, S., Keesstra, y D. Salesa. 2019. Beerkan multi-runs for characterizing water infiltration and spatial variability of soil hydraulic properties across scales. *Hydrol. Sci. J.* 64, 165–178.
- Lassabatere, L., R. Angulo-Jaramillo, J.M. Soria, R. Cuenca, I. Braud, y R. Haverkamp. 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments – BEST. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 521.532.
- Lassabatere, L., R. Angulo-Jaramillo, J.M. Soria-Ugalde, J. Simunek, y R. Haverkamp, R., 2009. Numerical evaluation of a set of analytical infiltration equations. *Water Resour. Res.* <https://doi.org/10.1029/2009WR007941>.
- Lassabatere, L., D. Yilmaz, X. Peyrard, P.E. Peyneau, T. Lenoir, J. Šimunek, y R. Angulo-Jaramillo, R., 2014. New analytical model for cumulative infiltration into dual-permeability soils. *Vadose Zone J.* 13, 1–15. <https://doi.org/10.2136/vzj2013.10.0181>
- Latorre, B., C. Peña, L. Lassabatere, R. Angulo-Jaramillo, y D. Moret-Fernández, D., 2015. Estimate of soil hydraulic properties from disc infiltrometer three-dimensional infiltration curve. Numerical analysis and field application. *J. Hydrol.* 57, 1–12.
- More, J.J. 1978. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory; in *Lecture Notes in Mathematics 630: Numerical Analysis*, G.A. Watson (Ed.), Springer-Verlag: Berlin, pp. 105–116.
- Moret-Fernández, D., N. Blanco, V. Martínez-Chueca, y A. Bielsa. 2013. Malleable disc base for direct infiltration measurements using the tension infiltrometry technique. *Hydrol. Proc.* 27, 275, 283.
- Moret-Fernández, D., B. Latorre, M.V. López, Y. Pueyo, L. Lassabatere, R. Angulo-Jaramillo, M. Rahmati, J. Tormo, y J.M. Nicolau. 2020. Three- and four-term approximate expansions of Haverkamp formulation to estimate soil hydraulic properties from disc infiltrometer measurements. *Hydrol. Proc.*, DOI: 10.1002/hyp.13966.
- Moret-Fernández, D., B. Latorre, M.L. Giner, J. Ramos, C.L. Alados, C. Castellano, M.L. López, J.J. Jimenez, y Y. Pueyo. 2019. Estimation of the soil hydraulic properties from the transient infiltration curve measured on soils affected by water repellency. *Catena* 178, 298–306
- Navas, A. 1991. The pattern of gypsum transport in the Ebro river network. *Catena* 18, 45–49.
- Parlange, J.Y. 1975. On solving the flow equation in unsaturated flow by optimization: horizontal infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 39, 415–418.
- Perroux, K.M. y I. White. 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 1205–Philip, J.R., 1957. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.* 84, 257–264.1215.
- Šimunek, J., M. Šejna, y M.T. van Genuchten. 1999. The HYDRUS-2D Software Package for Simulating the Two-dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-saturated Media. Version

- 2.0. U.S. Salinity laboratory, Agricultural Research Service, USDA, Riverside, California.
- Smettem, K., J. Parlange, P. Ross, y R. Haverkamp 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 1. A capillary-based theory. *Water Resour. Res.* 30, 2925–2929.
- van Genuchten, M.T., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898.
- Vandervaere, J.-P., M. Vauclin, y D.E. Elrick. 2000. Transient flow from tension infiltrometers I. The two-parameter equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1263–1272.
- Watson, y C.L., J. Letey. 1970. Indices for characterizing soil-water repellency based upon contact angle-surface tension relationships. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 34, 841–844.