

## INFILTRÓMETRO DE DISCO BASADO EN ANÁLISIS DE IMÁGENES REGISTRADAS CON UN TELÉFONO MÓVIL

B. Latorre y D. Moret-Fernández

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

**RESUMEN.** El infiltrómetro de disco es un método de campo ampliamente utilizado para medir las propiedades hidráulicas del suelo. Este trabajo presenta un nuevo diseño de infiltrómetro de disco de 10 cm de diámetro y altura, donde el nivel del agua se monitoriza con una cámara de teléfono móvil (Ca), sin cableado ni componentes electrónicos adicionales. El dispositivo se testó en laboratorio comparando medidas de nivel de agua visuales (V) con las registradas con Ca y transductor de presión (PT). Posteriormente, se validó en medidas de campo. Se observó un muy buen ajuste ( $R^2 = 0,99$ ) entre el nivel de agua medido en laboratorio con Ca y los obtenidos con V y PT. El método Ca resultó preciso, robusto e independiente de la posición relativa de la cámara. No se observaron diferencias significativas entre los valores de conductividad hidráulica y sorptividad estimadas en campo con PT y Ca.

**ABSTRACT.** The disc infiltrometer is a widely used field method for measuring the soil hydraulic properties. This work presents a new design of a disc infiltrometer with a 10 cm diameter and height, where the water level is monitored with a smartphone camera (Ca), without additional wiring or electronic components. The device was tested in laboratory by comparing visual water level measurements (V), with those recorded with Ca and pressure transducer (PT). Next, it was validated on field measurements. A very good fit ( $R^2 = 0.99$ ) was observed between the water level measured in the laboratory with Ca and those obtained with V and PT. The Ca method was accurate, robust and independent of the relative position of the camera. No significant differences were observed between the hydraulic conductivity and sorptivity values estimated with PT and Ca in the field measurements.

### 1.- Introducción

La caracterización de las propiedades hidráulicas de la superficie del suelo (sorptividad y conductividad hidráulica) es fundamental para el posterior modelado del transporte de agua la zona no saturada del suelo. El infiltrómetro de disco es un instrumento ampliamente utilizado para la estimación in situ de las propiedades hidráulicas del suelo. Este instrumento consta de una base circular unida a un depósito graduado de agua y una torre de burbujeo que impone una tensión en la base del infiltrómetro (Perroux y White, 1988). Si bien, por lo general, el diámetro del depósito de agua es más pequeño que la base del disco, existen los llamados infiltrómetros de mini-disco (Madsen y Chandler, 2007), donde la base y el depósito de agua tienen el mismo diámetro. La curva de infiltración acumulada se mide a

partir de la caída de nivel de agua del depósito. Originalmente, la curva infiltración acumulada se determinaba por notación visual del nivel del agua. Sin embargo, esta práctica que resulta tediosa y requiere una vigilancia constante, fue posteriormente reemplazada por sistemas automatizados basados en el uso de transductores de presión (Constantz y Murphy, 1987; Ankeny et al., 1988; Casey y Derby, 2002; Madsen y Chandler, 2007) o la técnica TDR (Moret et al., 2004). Recientemente, Klípa et al. (2015) desarrollaron un nuevo diseño donde la infiltración acumulada se medía a partir del grado de flotabilidad de una barra sólida vertical anclada en el depósito del infiltrómetro.

Aunque ha quedado demostrado que todas estas técnicas aplicadas en infiltrometría de disco permiten medidas precisas del nivel del agua, la dependencia de éstos sensores con la temperatura (Lord y Smith, 1983; Liu y Higgins, 2015; Pepin et al. al., 1995) puede afectar a la medida de la curva de infiltración en condiciones de campo, donde la temperatura cambia a lo largo del día. Sin embargo, aunque este problema podría resolverse introduciendo un factor corrector que tuviera en cuenta la temperatura, ello implicaría la incorporación de un nuevo sensor, que complicaría el método. Por otro lado, para el caso particular del transductor de presión, otra limitación asociada a esta técnica es la sensibilidad de este tipo de sensores al burbujeo dentro del depósito de agua, cuyos efectos tienden a aumentar al aumentar las tasas de infiltración (Spongrova et al., 2009). Este burbujeo introduce un ruido en la curva de infiltración que aumenta la incertidumbre en la estimación de las propiedades hidráulicas del suelo (Latorre et al., 2015).

El coste de los diferentes dispositivos para medir la caída del nivel de agua del infiltrómetro depende de la técnica empleada. Por ejemplo, el método más caro es el basado en la técnica TDR (Moret et al., 2004), cuyo instrumento puede llegar a costar varios miles de euros. Por otro lado, el aparato TDR, que necesita ser conectado a un ordenador portátil para la adquisición y análisis de las ondas TDR, utiliza sondas TDR largas, lo que limita su uso a depósitos de gran capacidad. Esta configuración, junto con los cables que conectan el instrumento TDR a la sonda correspondiente, hace que este método no sea muy manejable en condiciones de campo. Más económicos son los métodos basados en transductores de presión (Casey y Derby, 2002) o células de carga (Klípa et al., 2015), que solo requieren de un sensor (50-100 €) acoplado a un datalogger (200-700 €). Aunque esta configuración permite el uso de infiltrómetros más portátiles y manejables, el cable que conecta el datalogger al sensor puede dificultar su uso en áreas de difícil acceso. Para medidas de campo, es recomendable incorporar una

pantalla para verificar si los sensores están funcionando correctamente. Aunque este problema puede solucionarse utilizando dataloggers con pantalla digital, Campbell Scientific desarrolló una aplicación para teléfonos móviles (<https://www.campbellsci.es/loggernet>), que conectada vía bluetooth a un datalogger Campbell Scientific, permite verificar a tiempo real la curva de infiltración acumulada. Sin embargo, aunque este sistema permite eliminar cables, el uso de un adaptador bluetooth más teléfono móvil encarece el método.

Así pues, aunque todas técnicas descritas reemplazan a las medidas visuales, todas necesitan estar conectadas a un datalogger o PC, lo que aumenta el coste y complejidad del sistema. Además, el cable que conecta el sensor y el datalogger puede limitar su uso en áreas de difícil acceso. Por lo tanto, existe la necesidad de desarrollar un nuevo sistema de infiltrómetro de disco compacto e inalámbrico para facilitar las medidas de infiltración en condiciones de campo. Este trabajo presenta un nuevo diseño de infiltrómetro de disco compacto de 10 cm de diámetro y altura donde la caída del nivel del agua del depósito del infiltrómetro y la correspondiente curva de infiltración acumulada se miden tras previo análisis del video grabado con la cámara de un teléfono móvil. El dispositivo fue validado en el laboratorio, donde las medidas de nivel de agua realizadas con la cámara (Ca) se compararon con lecturas visuales (V) y las realizadas con transductor de presión (PT). El nuevo diseño fue validado en campo, donde la sorptividad y la conductividad hidráulica saturada del suelo estimadas a partir de la curva de infiltración acumulada medida con PT fueron compararon con la obtenidas a partir del video grabado con el teléfono móvil.

## 2.- Material y métodos

### 2.1. Infiltrómetro de disco de tensión

El sistema consta de un nuevo diseño infiltrómetro de disco compacto y un teléfono móvil con cámara (instalado en un trípode estándar) que permite registrar de forma continua el nivel de agua (Fig. 1). La descripción del sistema incluye: (i) diseño de infiltrómetro de disco, (ii) características de la cámara, (iii) análisis de las imágenes y (iv) medidas de laboratorio y campo.

#### 2.1.1. Diseño de infiltrómetro de disco

El nuevo diseño de infiltrómetro de disco se basa en los mismos principios físicos descritos por Perroux y White (1988), y consiste en una torre de burbujeo, un depósito de agua y una base circular (Fig. 2). La geometría externa, similar a la del infiltrómetro de minidisco (Madsen y Chandler, 2007), consiste en un tubo cilíndrico uniforme de metacrilato de 10 cm de longitud. El depósito de agua está cerrado por la parte superior y la cual está atravesada por dos tubos móviles de 6 mm de diámetro externo (Fig. 2). El primer tubo (tubo 1; Fig. 2), que está conectado a la torre de burbujeo, atraviesa longitudinalmente el cuerpo del infiltrómetro hasta una altura de 0,5 cm sobre la superficie

del suelo. La torre de burbujeo tiene un tubo móvil sumergido 0,5 cm en agua (tubo torre de burbujeo; Fig. 2) que permite compensar la sobrepresión producida por los 0,5 cm la altura entre el extremo del tubo 1 y la base del disco. Esto permite que la tensión en la base del infiltrómetro sea cero. El segundo tubo (tubo 2; Fig. 2), que queda insertado 2 cm dentro del infiltrómetro y tiene una válvula en su extremo, se utiliza para llenar, por succión el depósito del infiltrómetro.



Fig. 1. Infiltrómetro de disco.

El cuerpo del infiltrómetro tiene una pared de plástico que lo divide longitudinalmente en dos compartimentos (Fig. 2). Las dos secciones están conectadas por una ranura de 0,5 cm de altura realizada en la base y la parte superior de la pared, que permite la libre circulación de agua y el aire entre ambos compartimentos. Un lado del depósito alberga el tubo de burbujeo (extremo del tubo 1) y una boya cilíndrica de 2,5 cm de diámetro (Fig. 2). Esta boya, que está atornillada a la tapa del infiltrómetro, permite reducir el volumen de agua contenida en el depósito de agua. Dependiendo de la permeabilidad del suelo, se puede emplear una boya más delgada o más ancha y mejorar así la sensibilidad de medida de nivel de agua. El segundo compartimento del depósito de agua está vacío y tiene una cinta métrica adherida a la pared externa. Esta segunda cámara se utiliza para medir el nivel del agua con la cámara del teléfono móvil. La separación del depósito en dos compartimentos, minimiza el efecto de burbujeo (compartimento 1) sobre la lámina de agua a partir de la cual mide el nivel de agua (compartimento 2), evitando perturbaciones en la curva de infiltración. La base del infiltrómetro se cubre con una malla de acero de 5 mm de abertura, seguida de una malla de nailon de 44  $\mu\text{m}$  de luz (Fig. 2). Finalmente, se pegó un nivel de burbuja en la tapa superior del infiltrómetro para comprobar la nivelación del mismo cuando éste está infiltrando.

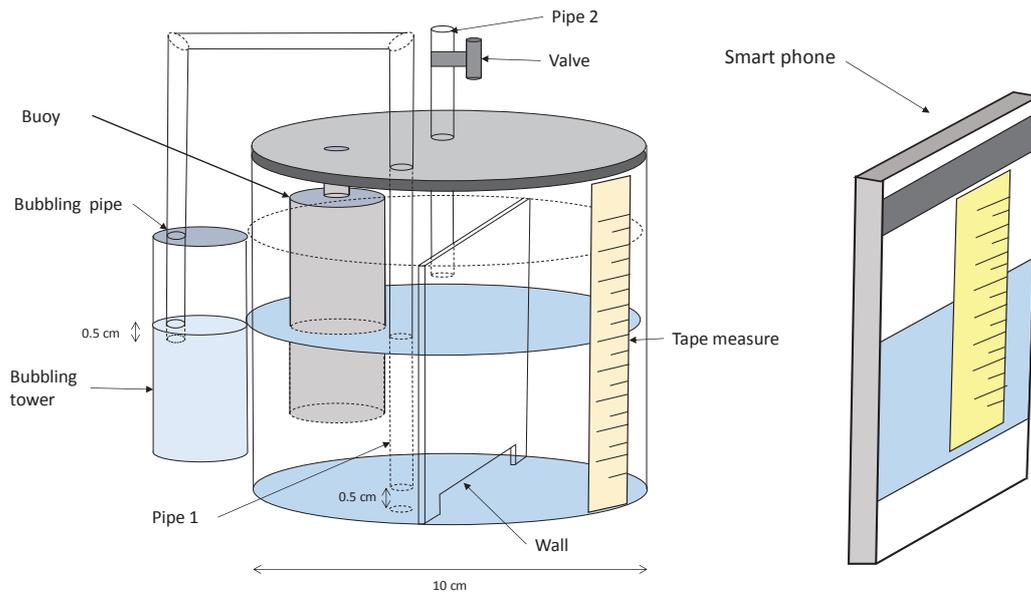


Fig. 2. Esquema del diseño del infiltrómetro de disco compacto.

### 2.1.2. Características de la cámara de video

Tras probar diferentes posibilidades (cámaras action, cámaras fotográficas estándar o endoscopio de enfoque automático), vimos que la cámara del teléfono móvil presentaba las mejores características, por varias razones. (i) permite grabar videos en HD, (ii) funciona con una APP de fotogramas gratuita, (iii) la pantalla necesaria para enmarcar y enfocar el depósito de agua está integrada en el mismo dispositivo, (iv) tiene un sistema sencillo para iniciar y detener la grabación de video en cada medida, (v) es un dispositivo compacto, portátil y manejable, donde la batería, cámara, pantalla e interruptores están integrados en un mismo dispositivo, y (vii) el coste es relativamente bajo, disponible desde 100 €.

En nuestro caso, se empleó un teléfono inteligente Android (modelo OPPO A9 2020). La cámara frontal tiene un sensor 48 megapíxeles (MP) de resolución y un tamaño de píxel de 0,8  $\mu\text{m}$ . Las lentes de la cámara tienen una apertura de  $f/1.8$ , un enfoque ajustable y un campo de visión (FoV) de 79 °. Las imágenes fueron grabadas con una APP de lapso de tiempo genérica y gratuita (Framelapse Pro 4.0) utilizando una resolución Full HD (1920  $\times$  1080 píxeles). El intervalo de adquisición de imágenes fue de 1 s. El teléfono, colocado verticalmente en un trípode flexible estándar, se dispuso frente al infiltrómetro a una distancia tal que todo el depósito quedara encuadrado en la pantalla, de modo que la cinta métrica quedaba centrada en la imagen (Fig. 1 y Fig. 3).

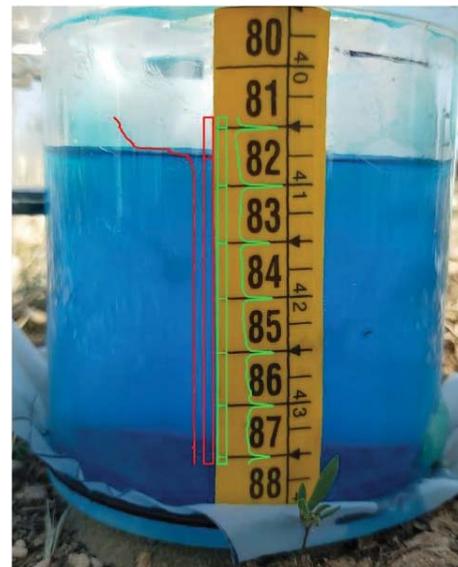


Fig. 3. Definición del nivel del agua y marcas en la cinta métrica.

### 2.1.3. Análisis de imagen

Se desarrolló un script en lenguaje R para el análisis automático de los fotogramas, utilizando para tal fin el paquete Imager CRAN y la herramienta 'FFmpeg' (Barthelme et al, 2015; Tomar, 2006). El análisis por separado de cada fotograma incluye los siguientes pasos:

- Tras extraer la secuencia de imágenes utilizando 'FFmpeg', se realizó un análisis manual para identificar la imagen en la que se posaba el infiltrómetro sobre el suelo. Este procedimiento consistió en comprobar los primeros fotogramas y seleccionar la imagen inicial correspondiente al momento en que se coloca y estabiliza el infiltrómetro de disco sobre la capa de arena.

- En esta imagen inicial, se identificaron manualmente dos puntos de cinta métrica con un espaciado conocido (6 cm en nuestros experimentos). Este análisis manual, que se realiza al principio de cada experimento de infiltración, permite calibrar los parámetros necesarios para el análisis secuencial de las imágenes de vídeo.

- Utilizando estos puntos de referencia, se rotaron las imágenes para alinear verticalmente el infiltrómetro. A continuación, se definieron dos ventanas rectangulares de análisis, una ubicada sobre la cinta métrica y la segunda en el agua teñida. A partir de los valores de color RGB, los cambios del canal rojo a lo largo de cada ventana permiten detectar de forma automática las marcas métricas en la cinta métrica y la posición del nivel del agua (Fig. 3). Las referencias de la cinta métrica se localizaron mediante un detector de picos. La posición del nivel del agua se identificó mediante un detector de pasos y un umbral basado en percentiles. La regresión lineal se calculó a partir de las posiciones de las marcas métricas para transformar las coordenadas de píxeles en unidades métricas sobre la cinta métrica:

$$H = ah + b \quad (1)$$

donde  $H$  representa el nivel del agua en unidades métricas,  $a$  y  $b$  son los coeficientes de la regresión lineal y  $h$  representa el nivel del agua en unidades de píxeles. La influencia de la distorsión de la lente se consideró despreciable, por lo que no se requirió corrección. Por ejemplo, los siete puntos de control de la cinta métrica visibles en la Fig. 3 presentan un ajuste lineal con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,9995$  y errores residuales de subpíxeles ( $< 0,1$  px).

- Dado que el nivel del agua observado por la cámara se ve afectado por la refracción de la luz a través de la pared de metacrilato provocando un desplazamiento variable, el nivel de agua real se calculó a partir del nivel de agua aparente o virtual, siguiendo una aproximación de óptica geométrica (Fig.4) (Apéndice I) para obtener la siguiente ecuación:

$$h' \cong h + \frac{T(h-w/2)}{naw/2} \tan(FoV/2) \quad (2)$$

donde  $h'$  y  $h$  representan los niveles de agua real y aparente respectivamente, ambos en unidades de píxeles,  $FoV$  es el campo de visión de la lente,  $T$  es el espesor de la pared en metros y  $n$  su índice de refracción,  $a$  es el factor de escala de la regresión en la Ec. (1) y  $w$  es el ancho de la imagen en unidades de píxeles. Finalmente, el nivel de agua real se transformó en unidades métricas utilizando la Ec. 1.

El análisis secuencial de los fotogramas asume que el depósito y la cámara del teléfono permanecen estáticos durante el experimento. En el caso de producirse un desplazamiento del infiltrómetro durante la medida (i.e. el proceso de colapso del suelo), sería necesario realizar un análisis del vídeo por partes. Para facilitar las medidas de infiltración obtenidas con la cámara de móvil, se desarrolló un script R específico para el análisis automático de los vídeos.

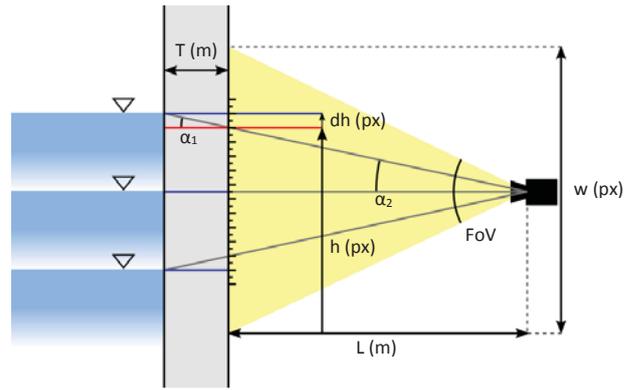


Fig. 4. Aproximación de la geometría óptica para calcular el nivel de agua real a partir del nivel de agua aparente o virtual visible a través de la pared de metacrilato.

#### 2.1.4. Montaje del infiltrómetro

Para aumentar el contraste del agua en el depósito y mejorara así la detección de la superficie de la lámina de agua, se agregó un tinte azul al agua de infiltración. En nuestro caso, se utilizó un colorante alimentario genérico, económico, biodegradable y no tóxico (Figs. 1 y 3). El tinte se disolvió previamente en la botella con el agua que luego se utilizará para llenar el infiltrómetro. En nuestro caso, agregamos 4 gotas de colorante alimentario por litro y medio de agua. Una vez emparejada la altura de la tubería 1 y tubería 2 (Fig. 2), se colocó el infiltrómetro sobre una bandeja que contenía el agua teñida y se procedió al llenado del infiltrómetro succionando a través de la tubería 2 (Fig. 2) hasta el llenado del depósito. Para mejorar las medidas del nivel del agua, la pared del depósito se limpió con un trapo húmedo antes de cada medida.

Para un mejor contacto entre la superficie del suelo y la base del infiltrómetro se colocó una fina capa de arena sobre la superficie del suelo (Perroux y White, 1988). La arena se niveló utilizando un tubo de metacrilato cerrado por la base y mismo diámetro y altura que el infiltrómetro, y que llamaremos tubo nivelador. La superficie de la arena se niveló tomando como referencia el nivel de burbuja fijado en la parte superior del nivelador (Fig. 1). El teléfono móvil, instalado boca abajo en el trípode, se colocó frente al nivelador a una distancia de aproximadamente 10 cm, para enfocar la imagen y cuadrar la distancia de la cámara de manera que todo el depósito fuera visible a través de la pantalla del teléfono móvil. Tras iniciar la grabación del vídeo, se reemplazó el nivelador por el infiltrómetro de disco lleno de agua (Fig. 1), orientado de manera que la cinta métrica quedara centrada en la imagen, momento en el que se inició la infiltración.

#### 2.2. Calibración de laboratorio

La precisión del nuevo dispositivo fue evaluada en laboratorio con dos experimentos complementarios. El primero consistió en comparar los niveles de agua medidos con la cámara (Ca) en condiciones estáticas, con los obtenidos con un transductor de presión (PT) y medidas

visuales (V). Se construyeron curvas de caída de nivel de agua en forma de escalera, donde cada paso correspondía a cada cm de la cinta métrica (Fig. 3). Para comprobar la influencia de la posición de la cámara con respecto al infiltrómetro, este experimento se repitió dos veces, colocando la cámara a diferentes alturas con respecto al infiltrómetro. Se empleó un transductor de presión de  $\pm 35$  cm, PT, (Microswitch; Honeywell International Inc.) previamente calibrado. El PT, conectado a un datalogger (CR1000; Campbell Scientist, Inc., Logan, UT, EE. UU.), se instaló en el infiltrómetro de disco según procedimiento descrito por Casey y Dervy (2002).

El segundo experimento de calibración consistió en comparar niveles de agua en continuo (Ca y PT) con lecturas de V. Las lecturas visuales correspondieron a cada cm de la cinta métrica. El experimento consistió en una infiltración a tensión 0 cm sobre un paño húmedo, cuyo exceso de agua de dejaba drenar por gravedad, realizándose una única réplica.

### 2.3. Experimentos de campo

Los experimentos de campo consistieron en comparar la curva de infiltración acumulada medida con Ca y PT, utilizando para ello un transductor de presión de  $\pm 35$  cm conectado a un datalogger. Se realizaron cuatro infiltraciones. Las dos primeras medidas se realizaron en una parcela de césped (G1 y G2), de suelo franco ubicada en la Estación Experimental de Aula Dei (CSIC), Zaragoza, España. Previo a las mediciones de infiltración, se cortó la hierba a ras de suelo. Se realizaron dos infiltraciones adicionales en dos parcelas bajo tratamiento convencional (CT) y no laboreo (NT). El campo experimental, de suelo franco, correspondió a un experimento de laboreo de conservación de larga duración iniciado en 1991 (López y Arrúe, 1995). La medida bajo CT se realizó en suelo recién labrado tras unas lluvias copiosas.

La densidad aparente seca del suelo ( $\rho_b$ ) se determinó con el método del cilindro, utilizando cilindros de 50 mm de diámetro y altura. Este muestreo se utilizó a su vez para determinar el contenido volumétrico de agua inicial ( $\theta_i$ ). Se colocó una fina capa ( $<1$  cm de espesor) de arena (tamaño de grano 80-160  $\mu\text{m}$ ) entre la base del infiltrómetro y la superficie del suelo, y la tensión aplicada fue de 0 cm. Al final del experimento y tras retirar la capa de arena, se tomó una muestra de suelo saturado para medir la humedad a saturación,  $\theta_s$ , calculada como el producto entre el contenido de agua gravimétrica saturada y  $\rho_b$ .

### 2.4. Estimaciones de propiedades hidráulicas del suelo

Las propiedades hidráulicas del suelo se estimaron utilizando procedimiento de Latorre et al. (2015), que consiste en minimizar la función objetivo,  $Q$ , que representa la diferencia entre la infiltración acumulada,  $I_{3D}$ , modelada ( $S, K_s, t$ ) y experimental ( $I_{e3D}$ )

$$Q(S, K) = \sum_{i=1}^N [(I_{e3D} - I_{3D}(S, K_s, t_i)) \Delta t]^2 \quad (3)$$

Las curvas  $I_{3D}$  fueron simuladas utilizando la solución de Haverkamp et al. (1994)

$$\frac{2(K_s - K_i)^2}{S^2} t = \frac{2}{1 - \beta} \frac{(K_s - K_i)}{S^2} \left\{ I_{3D} - K_i t - \frac{\gamma S^2}{r_d(\theta_s - \theta_i)} t \right\} - \frac{1}{1 - \beta} \ln \left[ \frac{1}{\beta} \exp(2\beta(K_s - K_i)(I_{3D} - K_i t)/S^2) + \frac{\beta - 1}{\beta} \right] \quad (4)$$

donde  $t$  es el tiempo (T),  $K_s$  y  $K_i$  ( $\text{LT}^{-1}$ ) son los valores de conductividad hidráulica correspondientes al contenido volumétrico de agua saturada,  $\theta_s$  e inicial,  $\theta_i$  ( $\text{L}^{-3}\text{L}^{-3}$ ), respectivamente,  $S$  ( $\text{LT}^{-0.5}$ ) es la sorptividad,  $r_d$  es el radio del disco (L),  $\beta$  y  $\gamma$  son constantes de infiltración con valores fijos de 0.6 y 0.75, respectivamente (Angulo - Jaramillo et al., 2000; Latorre et al., 2015). Todos los cálculos se realizaron a través de la dirección web <http://swi.csic.es/infiltration-map/>.

### 3.- Resultados y discusión

Se observó un buen ajuste entre el nivel del agua medido con el Ca en la curva en forma de escalera medida en laboratorio y los correspondientes valores obtenidos con V y PT (Fig. 5).

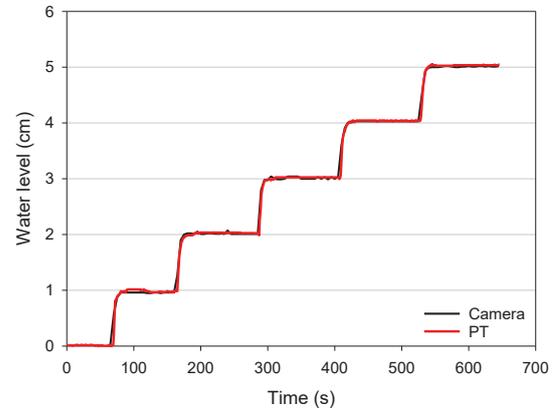


Fig. 5. Relación entre el nivel del agua medido en condiciones estáticas con cámara, transductores de presión (PT) y observación visual, correspondiéndose ésta última con las líneas horizontales de la figura.

La relación significativa entre V y Ca ( $y = 1.006x - 0.014$ ,  $R^2 = 0.999$ ,  $p < 0.0001$ ) y las obtenidas entre PT y Ca ( $y = 0.999x + 0.035$ ,  $R^2 = 0.999$ ,  $p < 0.0001$ ) indica que el método Ca permitió medidas precisas del nivel del agua en condiciones estáticas. La relación significativa entre las lecturas de V, PT y Ca cuando las medidas se realizaron colocando la cámara a diferente altura con respecto al infiltrómetro ( $y = 1.006x - 0.014$ ,  $R^2 = 0.999$ ;  $y = 1.0077x - 0.128$ ,  $R^2 = 0.999$ ) indica que el método es independiente de la posición relativa de la cámara. Este es un resultado relevante para experimentos de campo ya que las irregularidades de la superficie del suelo dificultan el

obtener una posición constante entre la cámara y el infiltrómetro de disco.

Se observó también un muy buen ajuste entre la curva de infiltración medida con Ca, PT y V sobre el paño humectado (Fig. 6). La excelente relación entre los niveles de agua medidos con Ca y PT ( $y = 1.018x + 0.009$ ,  $R^2 = 0.999$ ,  $p < 0.0001$ ) y los obtenidos al comparar las lecturas de Ca y V ( $y = 1.0105x - 0.0196$ ,  $R^2 = 0.999$ ,  $p < 0.0001$ ) indica que el método de cámara trabaja también correctamente en medidas en continuo. El examen visual de los videos mostró que el depósito compartimentado minimizó el efecto del burbujeo sobre las medidas del nivel del agua, lo que resultó en curvas de infiltración estables.

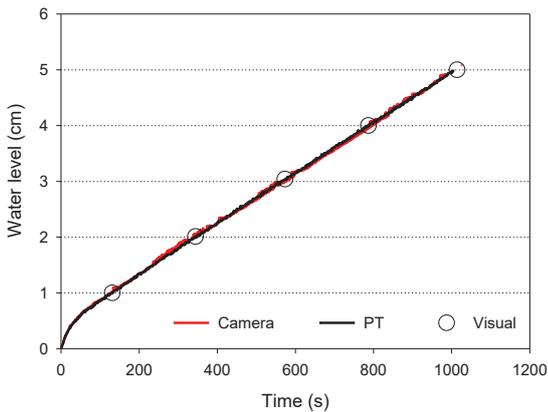


Fig. 6. Caída del nivel de agua medida en continuo con la cámara, transductores de presión (PT) y observación visual en un experimento de infiltración de laboratorio sobre un paño húmedo

Se observó también un buen ajuste entre las medidas de curva de infiltración obtenidas con Ca y PT en los experimentos de infiltración de campo (Fig. 7).

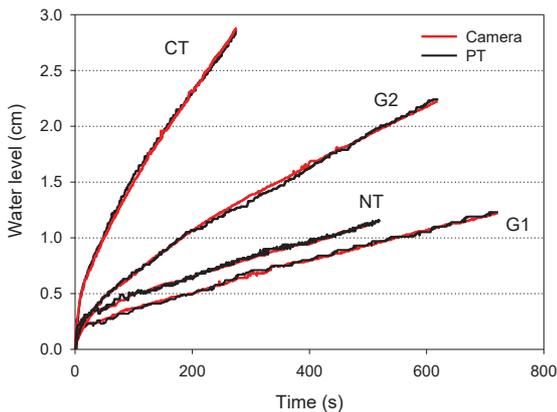


Fig. 7. Caída del nivel de agua medida con cámara y transductores de presión, PT, en los experimentos de campo. G1 y G2 son campos en zona de césped, y CT y NT tratamientos convencionales y no laboreo, respectivamente.

En comparación con el método Ca, PT produjo curvas de infiltración con pequeñas protuberancias en forma de sierra, probablemente debido a cambios discontinuos de

presión producidos por el burbujeo intermitente dentro del depósito (Spongrova et al., 2009). Otra explicación de estas irregularidades podría ser el posible efecto de la temperatura sobre las medidas de PT (Liu y Higgins, 2015). Este ruido prácticamente desapareció con el método Ca, donde las medidas de caída del nivel del agua son independientes de la presión dentro del depósito y la temperatura externa. Con respecto a la precisión de las medidas con Ca, la resolución espacial de los videos realizados fue de aproximadamente 0,008 cm (1,2 10<sup>-4</sup> psi) por píxel en el posicionamiento del nivel del agua. El análisis de los datos registrados con PT reveló una precisión efectiva similar de 0,009 cm (1,3 10<sup>-4</sup> psi), posiblemente determinada por la resolución del datalogger.

El análisis inverso de las curvas de infiltración muestra como los valores de  $Q$  obtenidos con PT (Ec. 3) fueron casi un 30% superiores a los obtenidos con Ca (Tabla 1), lo que significa que Ca dio curvas de infiltración más estables y menos ruidosas. Los valores similares de  $K_s$  y  $S$  obtenidos con ambos métodos (Tabla 1) indican que el método Ca es una técnica robusta para estimar las propiedades hidráulicas del suelo. Se obtuvieron relaciones altamente significativas, con pendientes cercanas a uno, entre  $S$  ( $y = 1.084x - 0.014$ ;  $R^2 = 0.99$ ;  $p < 0.0001$ ) y  $K_s$  ( $y = 0.986x - 0.0018$ ;  $R^2 = 0.94$ ;  $p < 0.0001$ ) estimadas a partir de las curvas de infiltración obtenidas con PT y el método Ca, respectivamente (Fig. 8).

Tabla 1. Densidad aparente del suelo,  $\rho_b$ , medida en los campos experimentales y sorptividad,  $S$ , conductividad hidráulica saturada,  $K_s$  y función objetivo,  $Q$  (Ec. 3) estimada a partir del análisis inverso de las curvas de infiltración acumulada medidas con transductores de presión, PT y el método de cámara (Ca) en las parcelas de césped (G1 y G2) y tratamiento de laboreo convencional, CT, y no laboreo, NT.

	$\rho_b$ g cm <sup>-3</sup>	$S$ mm s <sup>-0.5</sup>		$K_s$ mm s <sup>-1</sup>		$Q$ mm	
		PT	Ca	PT	Ca	PT	Ca
G1	1.52	0.18	0.17	1.02 10 <sup>-2</sup>	1.02 10 <sup>-2</sup>	9.74 10 <sup>-2</sup>	6.25 10 <sup>-2</sup>
G2	1.46	0.42	0.47	1.50 10 <sup>-2</sup>	8.32 10 <sup>-3</sup>	9.70 10 <sup>-2</sup>	7.07 10 <sup>-2</sup>
CT	1.17	0.75	0.78	3.63 10 <sup>-2</sup>	3.47 10 <sup>-2</sup>	1.39 10 <sup>-1</sup>	7.12 10 <sup>-2</sup>
NT	1.38	0.16	0.16	1.20 10 <sup>-2</sup>	1.12 10 <sup>-2</sup>	1.19 10 <sup>-1</sup>	6.43 10 <sup>-2</sup>

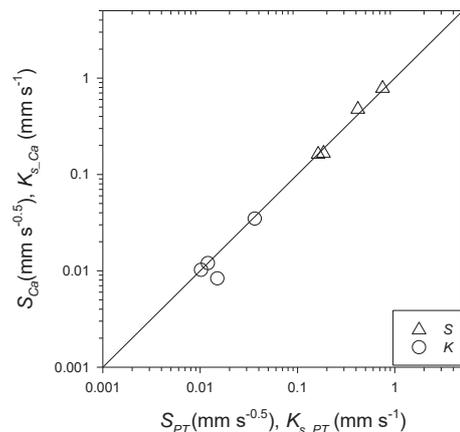


Fig. 8. Relación entre la sorptividad ( $S$ ) y la conductividad hidráulica ( $K_s$ ) estimada a partir de las curvas de infiltración medidas en campo medidas con los métodos PT y Ca.

#### 4. Conclusiones

Este artículo presenta un diseño alternativo de infiltrómetro de disco compacto de 10 cm de diámetro y altura, donde el nivel del agua se mide a partir del análisis de un video grabado con la cámara de un teléfono inteligente. Tanto los experimentos de calibración de laboratorio como los de infiltración de campo demostraron que la cámara permite estimaciones precisas del nivel del agua. El infiltrómetro de disco compacto es estable, fácil de manejar en condiciones de campo y permitió estimaciones satisfactorias de la sorptividad del suelo y la conductividad hidráulica. El uso omnipresente de los teléfonos inteligentes hace que esta técnica sea accesible para prácticamente todos los investigadores. El script R para analizar los videos fue escrito específicamente para este proyecto y se distribuye como software de código abierto (<http://swi.csic.es>), hace que esta técnica sea fácil de usar e implementar. En comparación con otros métodos, el nivel del agua medido con la cámara del teléfono inteligente no se ve afectado por la temperatura, un factor que puede variar en condiciones de campo, como en días soleados con nubes alternas. La inspección visual de los videos grabados permite verificar la validez de los niveles de agua calculados por el análisis automatizado de los videos. El diseño del infiltrómetro y la técnica de medida que se presenta en esta comunicación es inalámbrico, compacto, portátil, relativamente económico, preciso y fácil de manejar en el campo, lo que proporciona un avance importante para la medida de las propiedades hidráulicas del suelo.

*Agradecimientos.* Esta investigación fue apoyada por el proyecto MITECO ASBIO (PGC2018-094332-B-I00) y el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención No [H2020-MSCA-RISE-777803].

#### 5.- Bibliografía

- 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.
- Ankeny, M.D., T.C. Kaspar, y R. Horton. 1988. Design for an automated tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 893–896.
- Barthelme, S., D. Tschumperle, J. Wijffels, H.E. Assemblal, y S. Ochi. 2020. imager: Image Processing Library Based on 'CImg'. R package version 0.42.3.
- Casey, F.X.M., y N.E. Derby E. 2002. Improved design for an automated tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 66, 64–67.
- Constantz, J., Murphy, F., 1987. An automated technique for flow measurements from Mariotte reservoirs. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 252–254.
- 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.
- Klípa, V., M. Sněhota, y M. Dohnal. 2015. New automatic minidisc infiltrometer: design and testing. *J. Hydrol. Hydromech.* 63, 110–116. <https://doi.org/10.1029/2009WR007941>.
- 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.
- Liu, Z., y C.W. Higgins. 2015. Does temperature affect the accuracy of vented pressure transducer in fine-scale water level measurement?. *Geosci. Instr. Meth. Data Syst.* 4, 65–73
- López, M.V., y J.L. Arrúe., 1995. Efficiency of an incomplete block design based on geostatistics for tillage experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 1104–1111.
- Lord, M., y D.M. Smith M. 1983. Static response of a simple piezoelectric load cell. *J. Biomedical Eng.* 5, 162-164.
- Madsen, M.D., Chandler, D.G. 2007. Automation and use of mini disc infiltrometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 1469–1472.
- Masden, M., y D. Chandler. 2007. Automation and Use of Mini Disk Infiltrometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 1469-1472.
- Moret, D., M.V. López, y J.L. Arrúe. 2004. TDR application for automated water level measurement from Mariotte reservoirs in tension disc infiltrometers. *J. Hydrol.* 297, 229–235.
- Pepin, S., N.J. Livingston, y W.R. Hook. 1995. Temperature-dependent measurement errors in time domain reflectometry determinations of soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 38–43.
- Perroux, K.M. y I. White. 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1205–1215.
- Spongrova, K., C. Kechavarzi, M. Dresser, S. Matula, y R.J. Godwin. 2009. Development of an automated tension Infiltrometer for field use. *Vadose Zone J.* 8, 810–817.
- Tomar, S. 2006. Converting video formats with FFmpeg. *Linux J.* 146, 10.

#### APÉNDICE I

La Ec. 2 presenta una descripción detallada de la derivación de la ecuación. El nivel del agua observado por la cámara se ve afectado por la refracción de la luz a través de la pared del tubo de metacrilato, provocando un desplazamiento variable como se muestra en la Fig. 4. El nivel real del agua se calculó a partir del nivel del agua aparente o virtual, siguiendo una aproximación de óptica geométrica. La tangente de los ángulos  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  se calcula primero de la siguiente manera:

$$\tan(\alpha_1) = \frac{dh}{T/a} = \frac{h' - h}{T/a} \quad (5)$$

$$\tan(\alpha_2) = \frac{h - w/2}{L/a} \quad (6)$$

donde  $h'$  y  $h$  representan los niveles de agua real y aparente respectivamente, ambos en unidades de píxeles,  $T$  y  $L$  son el grosor de la pared y la distancia de la cámara en metros,  $a$  representa el factor de escala de la regresión en la Ec. (1) y  $w$  es el ancho de la imagen en unidades de píxeles. Se utilizó la ley de Snell para describir la relación entre los ángulos de incidencia y refracción:

$$n_1 \sin(\alpha_1) = n_2 \sin(\alpha_2) \quad (7)$$

donde  $n_2$  representa el índice de refracción del aire ( $n_2 \cong 1$ ) y  $n_1$  es el índice de refracción correspondiente de la pared de metacrilato, que simplemente se indicará como  $n$ . Suponiendo el trazado de rayos paraxiales, las tangentes y el seno de los ángulos pueden considerarse iguales:

$$n \tan(\alpha_1) = \tan(\alpha_2) \quad (8)$$

La sustitución de Ec. 5 y Ec. 6 en la Ec. 7 proporciona la siguiente relación:

$$n \frac{dh}{T/a} = \frac{h - w/2}{L/a} \quad (9)$$

donde se conocen todos los parámetros excepto el  $dh$  requerido y la distancia de la cámara  $L$ . Para derivar esta variable ( $L$ ), se calcula la tangente del ángulo FOV representado en la Fig.4:

$$\tan(\text{FoV}/2) = \frac{w/2}{L/a} \quad (10)$$

La sustitución de Ec. 10 en la Ec. 9 proporciona la relación final equivalente a la ecuación. 2:

$$dh = h' - h = \frac{T(h - w/2)}{n a w/2} \tan(\text{FoV}/2) \quad (11)$$