

COMPARACIÓN DE LOS PERMEÁMETROS DE GUELPH Y PHILIP-DUNNE PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA DEL SUELO

D. García-Sinovas¹, C. Regalado², R. Muñoz-Carpena², J. Álvarez-Benedi¹

¹ Servicio de Investigación y Tecnología Agraria, Junta de Castilla y León, Apdo 172, 47080- Valladolid.

² Instituto Canario de Investigaciones Agrarias, Apdo. 60, 38200 La Laguna, Tenerife

RESUMEN. El método de Philip-Dunne, consistente en la medición de tiempos de descarga de un tubo en el suelo, ha mostrado una potencial aplicabilidad muy elevada para la estimación de la conductividad hidráulica. En este trabajo esta metodología es comparada con otra comercialmente más extendida: la del permeámetro de Guelph (método de dos cargas hidráulicas). Para ello, se realizaron ensayos comparando la aplicabilidad y resultados de ambos permeámetros en tres parcelas con suelos de diferente heterogeneidad y textura. En el caso de Philip-Dunne se presenta un dispositivo automatizado, de forma que es posible la adquisición de datos de una batería de 8 permeámetros realizando medidas simultáneas gestionadas por un ordenador portátil en campo. Los resultados obtenidos con el permeámetro de Philip-Dunne fueron menos sensibles a la heterogeneidad, aunque los valores de la conductividad hidráulica fueron superiores a los obtenidos con el permeámetro de Guelph. De la comparación de ambos métodos se desprende una mayor aplicabilidad del permeámetro de Philip-Dunne en términos de portabilidad, aplicabilidad, tiempo de las medidas y facilidad de automatización. Sin embargo, su principal desventaja fueron los mayores requerimientos de cálculo en el tratamiento de los datos experimentales.

ABSTRACT. The Philip-Dunne permeameter for estimating soil hydraulic conductivity has been shown to be a method of considerable applicability. In this work, the Philip-Dunne methodology is compared to the more extended Guelph permeameter. Three experimental sites with different heterogeneity and textural characteristics were used in this study. The Guelph permeameter was used following the two constant head levels (5 and 10 cm). An automated Philip-Dunne device is presented, based on a simple and non-expensive device capable of handle up to 8 permeameters operating simultaneously in the field by means of a portable computer. The hydraulic conductivity estimated by means of the Philip-Dunne method was higher than the values obtained with the Guelph permeameter. The Philip-Dunne permeameter resulted advantageous in terms of portability, applicability, time of analysis, and ease of being automatized. On the other hand, the more remarkable disadvantage of the Philip-Dunne methodology was the numerical procedure required for the estimation of the hydraulic conductivity.

1.- Introducción

La conductividad hidráulica saturada en campo (K_{fs}) es una propiedad clave en la descripción de los procesos de infiltración y redistribución de agua en el suelo, motivo por el que el conocimiento de este parámetro es esencial para la solución de muchos problemas de aplicación agronómica. En la actualidad parece claro que la tendencia para hacer herramientas de predicción más fiables es avanzar en los aspectos metodológicos que permitan dar cuenta de valores representativos de las propiedades del suelo y de su variabilidad, por lo que es importante disponer de metodologías aplicables en muestreos con un elevado número de puntos. En concreto, la conductividad hidráulica es altamente variable en el tiempo y en el espacio (afectado por factores como el manejo del suelo), por lo que la determinación de un valor representativo puede requerir muestreos grandes para la caracterización espacial de un determinado escenario (Warrick & Nielsen, 1980).

El valor de la conductividad hidráulica depende en su mayor medida de la estructura del suelo, por este motivo el valor de la conductividad hidráulica para un determinado suelo una vez manipulado en el laboratorio, no tiene representatividad alguna respecto del valor en campo. Esto conduce a la necesidad de utilizar métodos de campo, que por lo general requieren mayor esfuerzo experimental. Existe una amplia variedad de métodos de campo basados cada uno en hipótesis y aproximaciones diferentes. Así, no es extraño que en función del método utilizado, los resultados de la determinación de la conductividad hidráulica resultan aparentemente diferentes (Dorsey et al., 1990; Gupta et al., 1993). Este hecho hace interesante evaluar los métodos de campo analizando los resultados desde un punto de vista estadístico. Pero también es importante evaluar la aplicabilidad de uno y otro método a la hora de intentar establecer un procedimiento de trabajo aplicable a grandes muestreos en campo.

Reynolds et al. (1983) presentaron el permeámetro de Guelph como una modificación del permeámetro presentado por Talsma y Hallam (1980). Este permeámetro consiste en un Mariotte construido con dos tubos concéntricos que actúan como depósito manteniendo la carga hidráulica constante en un hoyo practicado en el suelo. Los mismos autores desarrollaron además el procedimiento numérico para la determinación de los valores de la conductividad saturada en campo (K_{fs}) a partir de las mediciones de velocidad de flujo

infiltrándose en estado estacionario. La medida de K_{fs} con el método de Guelph es una técnica sencilla y relativamente rápida, aunque requiere un esfuerzo experimental considerable en el caso de muestreos de gran cantidad de puntos.

El método de Philip-Dunne es muy sencillo de poner en práctica ya que consiste en un tubo cilíndrico que se extiende hasta la base de un hoyo en el suelo. La concepción sencilla de la infiltración propuesta por Philip (1993) para la interpretación de resultados de una campaña de T. Dunne, fue explorada con detalle por De Haro et al. (1998) en este mismo foro de estudios de la Zona no Saturada. La medida de la conductividad hidráulica mediante el permeámetro de Philip-Dunne se mostró entonces como una herramienta de aplicabilidad potencial muy elevada.

Por otra parte, el método de Philip-Dunne admite una automatización relativamente sencilla, por lo que introduciendo una serie de modificaciones de tipo metodológico en la toma y tratamiento de los datos, puede convertirse en una herramienta con muchas ventajas para ser utilizada como técnica en campo.

El objetivo de este trabajo ha sido realizar una comparativa desde el punto de vista práctico de las metodologías de Guelph y Philip-Dunne. Para ello, además de los resultados obtenidos, se han evaluado los aspectos más importantes desde el punto de vista de aplicación de la técnica, evaluado la complejidad del dispositivo experimental (facilidad de construcción de una batería de permeámetros), coste de los dispositivos, tiempo de preparación y realización de la medida, mano de obra requerida, necesidad de agua para el análisis, metodología para el tratamiento de los datos y fiabilidad de los resultados.

2.- Materiales y métodos

2.1. Parcelas Experimentales

Las tres parcelas experimentales se encuentran en la provincia de Valladolid. La primera, en la finca de Zamadueñas del Servicio de Investigación y Tecnología Agraria, se encuentra situada en la tercera terraza del Pisuega, a una altura sobre su cauce de unos diez metros y se caracteriza principalmente por su elevada pedregosidad. En el momento del estudio, tenía una cubierta vegetal de cebada. La segunda parcela, se encuentra en el termino municipal de Villabáñez, es una terraza fluvial, con un elevado contenido en arcillas, también destinada al cultivo de cebada. La tercera está situada en el termino municipal de Alcazarén respondiendo al patrón típico de suelo arenoso de Tierra de Pinares, estando en barbecho en el momento de las mediciones.

Se realizó el análisis de suelo sobre un conjunto de 10 a 30 muestras en cada parcela, para determinar la textura (mediante el método de Bouyoucos) y los datos de pF (mediante las cámaras de presión de Richards). La Tabla 1 muestra los resultados del análisis mecánico y en la Tabla 2 se presentan los valores medios de los porcentajes de

humedad a distintas presiones.

Tabla 1. Texturas obtenidas por el método del densímetro de Bouyoucos.

Parcela	Limo %	Arena %	Arcilla %	TEXTURA
Zamadueñas	13,1	73,0	13,9	Franco-Arenosa ^(P)
Villabáñez	37,0	31,2	31,8	Franco-Arcillosa
Alcazarén	6,8	78,6	14,6	Franco-Arenosa

^(P) Parcela de Alta pedregosidad.

Granulometría (%):

>20 mm	20 – 6,3 mm	6,3 – 4,7 mm	4,7 – 2 mm	<2 mm
36	33	6	12	13

Tabla 2. Porcentajes de humedad a distintas presiones en la cámara de Richards

Parcela	Presión (atm)					
	0,33	1	2	5	10	15
Zamadueñas	11,9	9,8	8,4	7,4	6,0	5,7
Villabáñez	33,0	29,9	27,0	29,0	22,8	22,2
Alcazarén	4,9	2,8	2,4	2,2	2,2	2,0

A pesar de lo reflejado en la Tabla 1, hay que tener en cuenta que el análisis textural se lleva a cabo con suelos tamizados y por lo tanto no tiene en cuenta la pedregosidad de la parcela, aspecto este determinante en las propiedades hidráulicas del suelo. Por lo tanto, la aparente similitud de ambas parcelas experimentales no era tal en la práctica, como se ha de esperar de los experimentos con los permeámetros.

2.2. Construcción de la batería de permeámetros de Guelph

El desarrollo de los dispositivos utilizados fue precedido de un trabajo con varios prototipos, acompañado de una laboriosa búsqueda de soluciones a la larga serie de problemas experimentales que surgen cada vez que se pretende poner en práctica un prototipo, aunque este se encuentre detallado en la bibliografía (Talsma 1987; Reynolds & Elrick 1983, 1986, etc.) o incluso distribuido en el mercado.

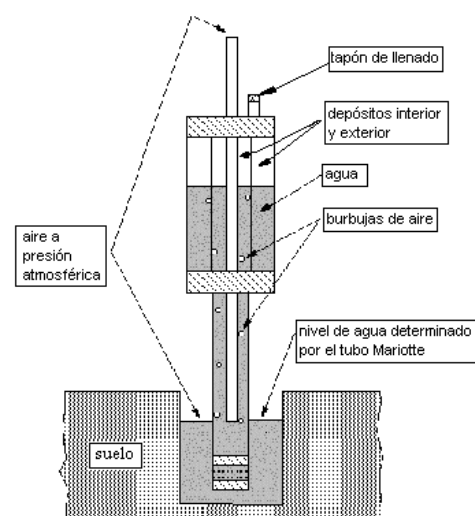


Fig. 1. Esquema del permeámetro de Guelph

El cuerpo del permeámetro consta de dos depósitos,

uno externo y otro interno, que fueron construidos con tubos de metacrilato de 80 mm de longitud, cuyos diámetros interiores y exteriores son, 74 mm y 80 mm para el depósito externo, y 20 mm y 25 mm para el depósito interno (según los estándares europeos de diámetros para este tipo de tubos).

Las tapas superior e inferior que cierran los depósitos anteriores, se mecanizaron en PVC. Para asegurar más la estanqueidad del conjunto, se utilizaron juntas tóricas y sellado con silicona en los cierres. La parte superior de los depósitos se comunica con un orificio practicado que permite el funcionamiento del Mariotte en ambos depósitos.

El Tubo Mariotte es también un estándar de metacrilato con diámetros interior y exterior de 7 mm y 10 mm, respectivamente. Dada su longitud, se construye en tres partes unidas por medio de racores neumáticos de 10 mm de diámetro, disponibles también en el mercado. Los detalles de su construcción y materiales se pueden encontrar en Antolín (2000). Se utilizaron dos cargas hidráulicas de 5 y 10 cm para todas las medidas siguiendo el procedimiento de cálculo descrito por Reynolds y Elrick (1986). Para ello es necesario además calcular el valor del factor de forma C . Siguiendo las recomendaciones de Reynolds et al., (1985) se utilizó la expresión de CHWP (Constant Head Well Permeameter), con $b=H/2$ que implica suponer que la longitud de la línea origen de presión es la mitad de la altura H de infiltración. Este método proporciona valores muy precisos de C contrastados por Reynolds et al. (1983). En nuestro caso se ha utilizado una barrena tipo Edelman de 7cm de diámetro, siendo el radio del agujero $a = 0.035$ m. Los valores obtenidos fueron:

$$C1 (H = 0.05 \text{ m}, a = 0.035 \text{ m}) = 0.6877$$

$$C2 (H = 0.10 \text{ m}, a = 0.035 \text{ m}) = 1.2676$$

2.3. Construcción de los permeámetros de Philip-Dunne

El permeámetro de Philip-Dunne se desarrolló de acuerdo a las indicaciones de De Haro et al. (1998). El dispositivo consta de un tubo cilíndrico de metacrilato cuyos diámetros interior y exterior son respectivamente 36 mm y 40 mm; En su extremo inferior se instaló una red de plástico de luz de malla 1,8 mm, que evita que el suelo pueda introducirse en el interior del permeámetro, particularmente en el momento de llenado.

En el tubo de metacrilato van insertados seis electrodos metálicos; dos en la parte superior que coinciden con el nivel de agua inicial, dos en su mitad, que corresponden al nivel medio y otras dos en la base, que indican el momento en el que el tubo se vacía por completo. Los tres electrodos de un lateral van unidos directamente entre sí; mientras que los otros tres pasan a través de tres resistencias de $2 \text{ K}\Omega$, $5,5 \text{ K}\Omega$ y $10 \text{ K}\Omega$ en orden ascendente, uniéndose posteriormente para pasar por una resistencia de referencia de $2 \text{ K}\Omega$. Los dos cables de salida van conectados a un convertidor Analógico/Digital (ICP-CON 7000), que puede gestionar 8 permeámetros y se conecta a través del puerto serie RS232

a un ordenador portátil. Un diodo LED se mantiene encendido mientras hay agua en el tubo, indicando que el experimento continúa y sirviendo de ayuda al operador en campo.

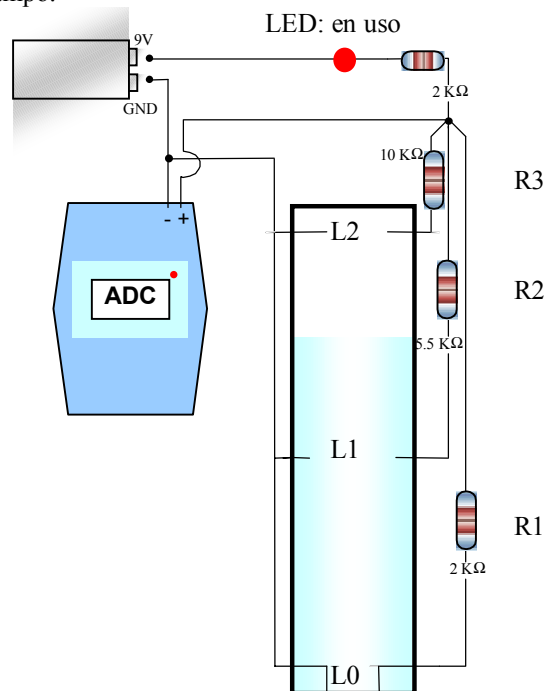


Fig 2. Esquema del permeámetro de Philip-Dunne con el sistema de adquisición de datos utilizado. ADC: Convertidor Analógico a Digital.

Con este diseño, la relación entre el nivel de agua y la tensión en el sistema de adquisición de datos, aunque depende en cierta medida de la conductividad eléctrica del agua (iones disueltos principalmente y temperatura en mucha menor medida), la señal es claramente distinguible entre un nivel y otro. La Tabla 3 muestra una relación típica entre nivel de agua y tensión en el sistema ADC:

Tabla 3. Valor de la tensión en función de las resistencias activas.

Nivel	Resistencias	Tensión
Lleno	R1+R2+R3	4,2 V
Entre L2 y L1	R1 + R2	3,9 V
Entre L1 y L0	R1	3,7 V
Vacío		0 V

Por lo tanto, la adquisición de los datos frente al tiempo permite detectar disminuciones en la tensión cuando se rebasan los niveles L2, L1 y L0 durante el vaciado del permeámetro. La adquisición de datos se gestiona desde un programa de ordenador. La gestión del sistema se lleva a cabo desde un programa de ordenador (Fig.3) que muestra la evolución de la tensión en cada dispositivo en una escala gráfica) y el nivel de agua en cada uno de los permeámetros. A la vez, el programa realiza un registro de los tiempos para cada experimento (t_{med} correspondiente a L1 y t_{max} correspondiente a L0, según De Haro et al.

1998), que son los datos utilizados posteriormente en la determinación de la conductividad hidráulica.

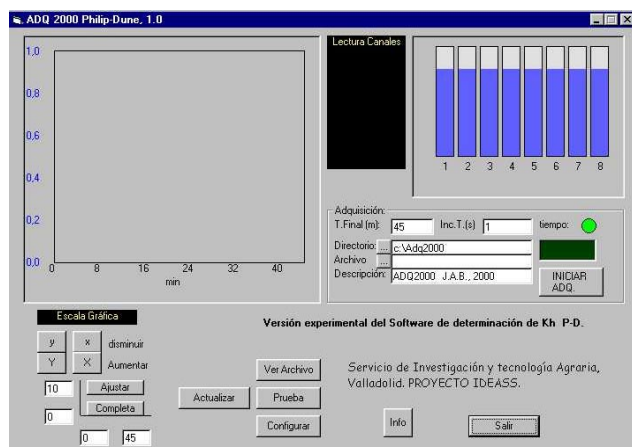


Fig 3. Programa para la determinación de la Conductividad Hidráulica método de Philip-Dunne

Para la determinación de la humedad del suelo se utilizó una sonda ML-2 (Delta-T, UK) y se siguió la metodología experimental expuesta por De Haro et al. (1998).

3.- Resultados y Discusión

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos en campo utilizando las dos metodologías en las tres parcelas del estudio. Para ello se presenta la media geométrica de la Conductividad Hidráulica, la Desviación Típica (D.T.) y el Coeficiente de Variación (C.V.) de todos los datos de campo, por parcela y metodología empleada.

Tabla 4. Datos de la Conductividad Hidráulica ($\cdot 10^5$ m/s), Desviación Estándar ($\cdot 10^2$) y Coeficiente de Variación (%).

	PHILIP-DUNNE			GUELPH		
	Zamad.	Villabáñez	Alcazarén	Zamad.	Villabáñez	Alcazarén
M G	7.95	5.07	16.47	1.27	3.00	3.22
D. T.	10.82	3.92	9.55	0.68	1.95	1.86
C. V.	135.8	77.3	58.0	67.6	64.8	57.7

En la Tabla 4 se observa que las diferencias entre las tres parcelas son más evidentes con la metodología de Philip-Dunne, siguiendo un orden creciente en función del contenido de arena del suelo. Por el contrario, con la metodología de Guelph no se son tan claras, incluso el suelo de Alcazarén, notablemente arenoso, ofrece mayor conductividad hidráulica que el de Villabáñez. No obstante, esta discrepancia aparente queda matizada en parte cuando se considera la variabilidad de los resultados.

El valor de la conductividad hidráulica es de esperar que esté sujeto a una gran variabilidad debido a la presencia de piedras, grietas, raíces y material vegetal, etc. Por este motivo, si cualquier parámetro medido en campo presenta una gran variabilidad, para la conductividad hidráulica hemos de esperar un efecto mucho más marcado.

Considerando los datos obtenidos con el permeámetro de Philip-Dunne, los coeficientes de variación son claramente mayores en Zamadueñas que en la parcela de Alcazarén. La primera es una parcela de alta pedregosidad mientras que en la segunda es un suelo más homogéneo desde el punto de vista estructural. Considerando los coeficientes de variación de 50% a 100% es preciso matizar convenientemente las conclusiones.

La Figura 4 muestra los valores medios obtenidos con cada método y los publicados para esas texturas por Carsell y Parrish (1988). Estos últimos consideran únicamente la textura, por lo que no pueden reflejar diferencias entre parcelas de diferente pedregosidad. Considerando esta figura, los resultados obtenidos con el permeámetro de Philip-Dunne han sido sistemáticamente más altos, si bien también han llevado una tendencia más lógica (suelo más arenoso > suelo pedregoso > suelo arcilloso).

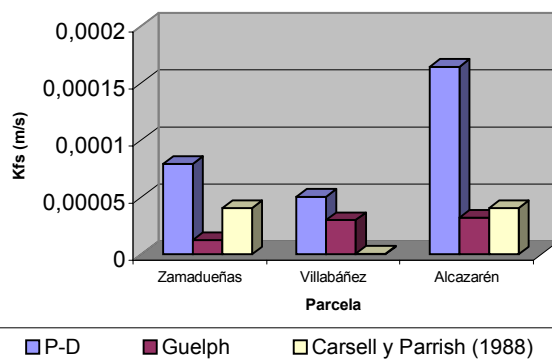


Fig 4. Valores de Kfs en las tres parcelas.

Por otro lado, los valores de Guelph en la parcela de Villabáñez (Franco-Arcillosa) fueron superiores a los obtenidos en Zamadueñas (Franco-Arenosa), lo que va en contra de lo esperado. En nuestra opinión esto se debe a la poca fiabilidad del método de dos cargas hidráulicas para el que aparecieron frecuentemente valores negativos de K_{fs} . En principio, es conocido el alto número de valores negativos de K_{fs} que se obtienen con el método de dos cargas hidráulicas debido a la no homogeneidad del suelo (Dafonte et al., 1999). Si bien los resultados negativos pueden desecharse, con la certeza de que son erróneos, la duda surge cuando éstos son positivos, pues no existe ninguna prueba de que sean válidos por el mero hecho de que sean positivos. Wu et al. (1993) demostraron cómo este método ofrecía valores erráticos de conductividad hidráulica en suelos con macroporos o capas muy diferenciadas, ya que la teoría en la que se basa asume un modelo isotrópico. Por razones que no entramos a analizar en profundidad, las aproximaciones en las que se basa el desarrollo de Philip (1993) parecen menos sensibles a estos problemas.

Respecto a la comparación con los datos publicados por Carsell y Parrish (1988) corresponden a las medias de una larga colección de suelos y han de ser considerados

como estimaciones. Por otra parte, las clasificaciones texturales agrupan suelos de muy diferentes características: basta tener en cuenta la gran variabilidad de suelos dentro de una misma textura como la franco-arenosa, de dos de los utilizados en este estudio. Así, en función de la textura no habría que esperar diferencias entre los suelos de las parcelas de Zamadueñas y Alcazarén. Sin embargo, una rápida inspección a ambas parcelas permite comprobar que se trata de suelos con condiciones hidráulicas muy diferentes. No obstante, no hay que olvidar que la determinación de textura considera sólo fracciones de tamaños de partícula inferiores a 2 mm, mientras que en la conductividad hidráulica la macroporosidad generada por la pedregosidad, las raíces y la propia estructura del suelo, puede ser mucho más decisiva.

Por lo tanto, puede comentarse que los resultados obtenidos están dentro del orden de magnitud de lo publicado en la bibliografía, pero que las condiciones particulares de cada parcela (por encima de la textura) pueden ser mucho más importantes a la hora de determinar el valor de la conductividad hidráulica en campo. No es recomendable, entonces, realizar estimaciones de la conductividad hidráulica basadas en el análisis textural de un determinado escenario.

4.- Conclusiones

La metodología de Guelph es, desde el punto de vista matemático, más sencilla: aunque presenta unas aproximaciones inherentes en el cálculo del factor de forma (C), los errores que pudieran introducirse en el factor de forma quedan enmascarados por la gran variabilidad de esta propiedad en campo. El método de cálculo propuesto por Reynolds y Elrick (1985) es sencillo, pero hubo que desechar muchos valores de K_{fs} negativos.

La metodología de Philip-Dunne es más sofisticada desde el punto de vista matemático, pues requiere la búsqueda de una raíz en una ecuación no lineal (De Haro et al., 1998) y la convergencia del algoritmo empleado depende de las condiciones iniciales, por lo que es más difícil de generalizar como método de utilización fuera de investigación. Así, mientras en la metodología de Guelph se puede llevar a cabo con una calculadora o una hoja de Excel, en el caso de Philip-Dunne se requieren métodos matemáticos robustos capaces de adaptarse sin problemas numéricos de convergencia al amplio elenco de situaciones experimentales posibles. Este puede ser el inconveniente más serio a la hora de poner en práctica la nueva metodología, comparada con la anterior, ya universalmente extendida. Los autores disponen de algoritmos a disposición de actividades de investigación y docencia en las versiones de programa de ordenador (que corre en una ventana de MSDOS) y código de la aplicación *Mathematica*.

Los resultados de conductividad hidráulica han presentado una elevada variabilidad con coeficientes de variación en un rango de 58 a 134%. Este hecho hace que las diferencias en los valores de conductividad hidráulica obtenidos con uno y otro método sean de menor

importancia. En todo caso, los valores medios obtenidos con el permeámetro de Guelph fueron inferiores en las tres parcelas

La utilización de valores de textura para realizar una estimación de la conductividad hidráulica de un suelo puede llevar a errores de uno o varios órdenes de magnitud. Esto es debido a dos causas principalmente: dentro de una textura determinada, los contenidos de arena, arcilla y limo pueden variar dentro de intervalos relativamente grandes. Además, los componentes gruesos junto con las raíces y la propia estructura del suelo tienen un efecto final en el transporte de agua en suelos mucho más importante que la propia composición textural, limitada a la fracción por debajo de 2 mm.

La Tabla 5 muestra una comparación, desde el punto de vista práctico de las principales conclusiones prácticas de la aplicación de los métodos utilizados en este trabajo

Tabla 5. Comparación de las metodologías de Guelph (2 cargas hidráulicas) y Philip – Dunne para la determinación de K_{fs} .

	Guelph	Philip-Dunne
Coste		***
Portabilidad		**
Requerimientos de agua		*
Tiempo de preparación de las medidas		*
Duración de la medida		*
Facilidad de manejo	*	*
Posibilidad de automatización	*	***
Mano de obra		**
Comportamiento en suelos heterogéneos		**
Tratamiento matemático de los datos	***	

Ambos son métodos fáciles de llevar a la práctica, si bien el coste de adquisición o fabricación del permeámetro de Guelph es considerablemente superior. Por lo tanto. Es difícil disponer de una batería de permeámetros necesaria para la realización de muestreos con un número de datos representativo. Otra característica interesante es la portabilidad de los diferentes permeámetros, aspecto a tener en cuenta en equipos a utilizar en campo (particularmente si se utiliza una batería de equipos): el permeámetro de Guelph es considerablemente más grande y pesado. Una persona puede llevar una unidad, mientras que los dispositivos de Philip-Dunne son mucho más ligeros y de tamaño reducido. En el mismo sentido hay que destacar que los requisitos de agua son considerablemente menores en el caso de Philip-Dunne, lo que es interesante si no se dispone de agua en la zona de muestreo. El tiempo de preparación del ensayo y la duración de la medida es bastante similar, si bien en el caso de Guelph el permeámetro se transporta desarmado y requiere cierto tiempo para su montaje y llenado de los depósitos. La duración de la medida con el método de dos cargas hidráulicas es mayor en Guelph, la utilización de experimentos con una sola carga requiere aceptar aproximaciones que pueden no cumplirse con rigor en todas las situaciones.

Aunque los dos métodos son susceptibles de automatización, el dispositivo presentado en este trabajo muestra una posibilidad sencilla para el permeámetro de Philip-Dunne, que se muestra más ventajoso en este caso,

lo que puede reducir considerablemente la mano de obra requerida.

Por último, se han reflejado en la tabla los ya mencionados mayores requisitos de cálculo para el tratamiento matemático de los datos en el caso de Philip-Dunne.

Agradecimientos. Los autores agradecen a J.V. Giráldez y a su equipo de colaboradores su ayuda en la puesta en práctica del método de Philip-Dunne y en la recopilación de bibliografía indispensable para este estudio. Este trabajo fue financiado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), proyecto IDEASS (SC-99-024-C2).

5.- Referencias

- Antolín Barriuso, R. 2000, Caracterización espacial de la conductividad hidráulica en parcelas experimentales mediante los permeámetros de Guelph y Philip-Dunne, Trabajo Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (Ing. Téc. Agrícola, Explotaciones Agropecuarias), Palencia.
- Carsel R.F., y R.S. Parrish, 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.*, 24:755-769.
- Dafonte Dafonte, J. Valcárcel Armesto, M. Neira Seijo, X. X. 1999. *Análisis de los métodos de cálculo de la conductividad hidráulica saturada de campo medida con permeámetro de Guelph*. Estudios de la zona no saturada del suelo. Pp: 5-10. Tenerife
- De Haro, J. M., Vanderlinden, K., Gómez, J. A. y Giráldez, J. V. 1999, Medida de la conductividad hidráulica saturada del suelo con el infiltrómetro de Philip-Dunne: Aplicabilidad y usos. *Progresos en la investigación en zona no saturada*. Pp: 9-20. Huelva
- Dorsey, J. D., Ward, A. D. and Fausey, N. R. , 1990. *A comparison of four fields methods for measuring saturated hydraulic conductivity*. *Trans. ASAE*. Vol 33(6) 1925-1931.
- Gupta, R. K., Rudra, R. P. and Dickinson, W. T. 1993. *Comparison of saturated hydraulic conductivity measured by various field methods*. *Trans. ASAE* 36(1):51-55.
- Philip, J.R. 1993, Approximate Analysis of The borehole permeameter. *Water Resour. Res.* 29: 3763-3768.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E., and Topp, G.C. 1983. *A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table*. *Soil Sci.* 136 (4): 250-268.
- Reynolds, W.D. and Elrick, D.E. 1985. *In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the alpha-parameter using the Guelph permeameter*. *Soil Sci.* 140 (4): 292 – 301.
- Reynolds, W.D. and Elrick, D.E. 1986. *A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship*. *Ground Water Monitoring Review* 6 (1): 84 – 95.
- Talsma T, P.M. Hallam, 1980, Hydraulic conductivity measurement of Forest Catchments. *Aust. J. Soil. Res.* 18;:139-148.
- Talsma, T. 1987. *Re-evaluation of the well permeameter as a field method for measuring hydraulic conductivity*. *Aust. J. Soil. Res.* 25: 361-368.
- Warrick, A. and Nielsen, D. 1980. *Spatial variability of soil physical properties in the field*. En *Applications of soil physics* de Daniel Hillel. Pp: 319-344.
- Wu, L., Swan, J. B. and Nieber, 1993.. *J. Soil-macropore and layer influences on saturated hydraulic conductivity measured with borehole permeameters*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:917-923.