



## ESTIMACIÓN DE LA INFILTRACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA CON PERMEÁMETRO DE GUELPH

**Manuel García Rodríguez**

Facultad de Ciencias. Dpto. Ciencias analíticas. UNED

[manu.garo@ccia.uned.es](mailto:manu.garo@ccia.uned.es)

Recibido: 26 de abril de 2013

Enviado a evaluar: 30 de abril de 2013

Aceptado: 14 de mayo de 2013

### RESUMEN

Se estudia la capacidad de infiltración del terreno de una parcela rural con objeto de conocer su comportamiento frente a posibles encharcamientos en periodos de lluvias intensas. La determinación del coeficiente de escorrentía, la realización de balances hídricos del suelo en diferentes hipótesis, y los ensayos de permeabilidad utilizando el permeámetro de Guelph, han suministrado información relevante sobre el comportamiento del suelo como elemento de retención del agua ante precipitaciones extraordinarias.

**Palabras clave:** Permeámetro de Guelph, hidrogeología Mesa de Ocaña, estimación infiltración.

### RAIN WATER INFILTRATION ASSESMENT USING THE GUELPH PERMEAMETER

### ABSTRACT

This paper presents a study on infiltration capacity of the soil in a rural land in order to know its behavior against possible flooding during periods of heavy rainfall. The determination of the runoff coefficient, the water balance soil on different assumptions and permeability testing with the Guelph permeameter have provided information on soil behavior as retaining element of rainwater with extraordinary rainfall.

**Keywords:** Guelph permeameter, hydrogeology of Mesa de Ocaña, infiltration assessment.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Conocer el proceso de infiltración de agua en el suelo se considera imprescindible para planificar su uso tanto en prácticas agropecuarias como en trabajos relacionados con obra civil, con objeto de evitar inundaciones en periodos de lluvias extraordinariamente fuertes, particularmente en zonas de topografía muy plana. Además, el estudio del proceso de infiltración permite establecer relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas, aportando información sobre los mecanismos de recarga de los acuíferos.

Existen diversos mecanismos para conocer la permanencia y distribución del agua en el suelo, tales como la realización del balance hídrico del suelo a partir de datos meteorológicos, o el empleo de métodos para determinar la escorrentía. Igualmente existen varios instrumentos de campo que permiten medir directamente la infiltración en el terreno (Reynolds, 1993; Angulo Jaramillo et al., 2000). Las medidas de campo proporcionan información sobre la infiltración de un área concreta. Se admite que tanto a escala de parcela como de cuenca, la permeabilidad y capacidad de infiltración presentan una gran variabilidad espacial y temporal (Byers y Stephens, 1983; Bosch y West, 1998). Esa variabilidad es particular de cada suelo y depende de diferencias texturales y composicionales, así como de los usos al que sea destinado (Vieira et al., 1983).

Dada la importancia que tiene determinar la infiltración en la capa superficial del suelo, actualmente existen diversos instrumentos para realizar mediciones en campo. En este trabajo se ha optado por utilizar el permeámetro de Guelph, que permite determinar la permeabilidad del terreno a diferentes profundidades desde la superficie del suelo (Reynolds et al., 1985; Vauclin et al., 1994).

En este trabajo se estudia el movimiento del agua en el suelo en una parcela de terreno agrícola actualmente en desuso, localizada en el término municipal de Ocaña (Toledo). El objetivo concreto ha sido conocer la capacidad de drenaje e infiltración del agua en el suelo ante lluvias intensas. Con tal propósito, en primer lugar se hizo el balance hídrico del suelo con el método de Thornthwaite, posteriormente se determinó el coeficiente de escorrentía, y por último se realizaron cinco ensayos de infiltración con el permeámetro de Guelph. Por otra parte, las determinaciones llevadas a cabo han suministrado información sobre el papel del suelo como elemento de retención del agua de lluvia y sus efectos en la recarga del acuífero infrayacente.

La finca en la que se han realizado los ensayos tiene una superficie de una hectárea. Se caracteriza por una topografía bastante plana, con cotas que oscilan entre unos 735 y 730 m.s.n.m, y una pendiente del orden de 4 por mil. Se trata por tanto de una zona que prácticamente carece de drenaje natural fuera de los límites de la finca, ofreciendo unas condiciones adecuadas para estudiar la infiltración y retención del agua en el suelo mediante el empleo de métodos diversos.

### **1.1. Geología**

La zona de estudio se localiza en la zona nororiental de la unidad geomorfológica de la conocida "Mesa de Ocaña". Dicha unidad constituye una planicie suavemente inclinada hacia el SE, cortada por el valle del río Tajo al Norte. El entorno geológico de la zona aparecen representados materiales terciarios (IGME, 1985) dispuestos subhorizontalmente. La parte más superficial está cubierta por materiales cuaternarios y puntualmente por rellenos antrópicos.

El Mioceno está constituido por dos grandes conjuntos; el inferior con materiales de finales del Burdigaliense y todo el Vindoboniense, y el superior por materiales del Vindoboniense - Pontiense. De muro a techo encontramos las siguientes litologías:

*a. Conjunto inferior (Burdigaliense - Vindoboniense)*

*Unidad margoyesífera:* Representa la base del mioceno en la zona. El tamo inferior son niveles yesíferos y arcillo-yesíferos, que hacia techo se hacen más margosos en estratos de espesor decimétrico. En general se trata de yesos sacaroideos blancuzcos o rosados, y margas yesíferas verdosas y grisáceas. Presentan frecuentes cambios laterales de facies. Estos materiales no afloran en la zona de estudio. Según algunos sondeos de investigación descritos en García Rodríguez, M. y García Rodríguez, C. (2004), en zonas próximas el techo de esta serie se localiza aproximadamente a la cota 675 m, es decir, a unos 60 m de profundidad desde la superficie topográfica.

*Unidad arcillosa:* Aparece a modo de cuña detrítica intercalada entre las margas yesíferas. Se trata de arcillas de tonos marrones y rojizos, con cristales de yesos dispersos. Estos materiales no afloran en la zona de estudio.

*b. Conjunto superior (Vindoboniense – Pontiense)*

Esta unidad constituye el substrato rocoso de la zona. Está representado por una alternancia de calizas grises y margas calcáreas, con intercalaciones de niveles algo yesíferos. De muro a techo podemos encontrar los siguientes materiales (García Rodríguez, M. y García Rodríguez, C., 2004):

*Materiales carbonatados:* Se trata de una alternancia de calizas grises y margas calcáreas con alguna intercalación yesífera. Los espesores de estos materiales tienen una gran variación espacial, entre 1 y 10 metros, predominando espesores pequeños. En general, las calizas presentan frecuentes intercalaciones arcillo-margosas, que con cierta frecuencia alcanzan proporciones del 50% dentro del paquete calcáreo.

*Materiales detríticos:* Se trata de arcillas y paleocanales rellenos de arenas silíceas con vetas arcillosas y de calizas.

*Materiales de la unidad carbonatada superior:* Se dispone concordante con el anterior. El substrato aflorante en el área de estudio está constituido por costras de caliza margosa de estructura brechoide, de espesores variables de 15 centímetros a 2 metros. Ocasionalmente se encuentran intercalaciones de capas centimétricas a decimétricas de arcillas arenosas y abundantes nódulos calcáreos. En las proximidades de la zona de estudio se ha localizado un afloramiento de calizas, con alguna intercalación de caliza margosa, ocasionalmente de aspecto conglomerático, bastante carstificadas (Figura 1a y 1b). Los cuatro o cinco metros más superficiales están muy meteorizados.

El trabajo de Geoestudios, S.A. (2006), clasifica a estos materiales en el grupo 1,5 de la clasificación de suelos UIC 719-R, con condiciones hidrológicas adecuadas en cuanto a un correcto drenaje y a la ausencia de un nivel freático a 10 metros, profundidad alcanzada por los sondeos de dicho estudio.

*c. Cuaternario y formaciones superficiales*

Los depósitos cuaternarios están representados por arcillas limosas y arcillas arenosas procedentes de la alteración de la unidad carbonatada infrayacente (Figura 1c). El espesor de estos materiales varía entre 3,6 metros y 1,5 metros. Los 20 o 30 centímetros más

superficiales presentan restos vegetales y textura terrosa correspondiente a tierra de labor y a suelos en el sentido edáfico.

**Figura 1.** (a) Afloramiento de la unidad carbonatada superior, (b) Detalle de la unidad carbonatada superior y (c) Detalle de los depósitos cuaternarios de la superficie del terreno.



## 1.2. Hidrogeología

La zona estudiada pertenece al sistema acuífero nº 20, según la clasificación del IGME, o a la unidad hidrogeológica 03.08 según la DGOH-ITGE (1988).

El sistema acuífero nº 20, pertenece a las cuencas del Tajo y Guadiana. El área de influencia de la zona objeto de este trabajo se localiza íntegramente en la cuenca del Tajo, en particular en su borde noroccidental, en la denominada Mesa de Ocaña. Se trata de calizas miocenas que ocupan una superficie total de 1200 km<sup>2</sup>, con una superficie aflorante de 900 km<sup>2</sup>.

## 2. MÉTODO

La metodología seguida en este estudio para la consecución de los objetivos previstos ha consistido en dos fases:

- Caracterización geológica e hidrogeológica.
- Balance hídrico del suelo.
- Cálculo del coeficiente de escorrentía.
- Ensayos de infiltración con el permeámetro de Guelph.

### 2.1. Caracterización geológica e hidrogeológica

Con carácter previo a la realización de ensayos en la parcela experimental se ha procedido a reconocer el entorno geológico e hidrogeológico de la zona. Durante el inventario de puntos de agua se han localizado únicamente dos manantiales y un pozo perforado, cuyas características se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Resumen del inventario de puntos de agua

	Tipo de captación	Localización (Coordenadas)	Cota del agua (m)	pH	Conductividad eléctrica agua ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
<b>Fuente Berrallo</b>	Manantial	39°57'58" N 03°28'22" O	685	8,3	701
<b>Fuente Grande</b>	Manantial (Q=0,12 l/s)	39°57'42" N 03°30'18" O	695	8,1	713
<b>Pozo 1</b>	Pozo perforado	39°59'20" N 03°28'22" O	715		Sin dato
<p><b>Observaciones</b> Aguas abajo de la Fuente Grande, en las inmediaciones de la Ermita Jesús de las Cuevas hay otras surgencias de características muy similares. Según información verbal de algunos trabajadores de la zona, durante los últimos 15 años, el nivel freático ha ido descendiendo progresivamente hasta dejar varios manantiales y pozos (de profundidades comprendidas entre 20 y 30 m) completamente secos.</p>					

Los dos manantiales se ubican en la periferia de la zona de estudio, allí donde la erosión fluvial se ha encajado y erosionado las calizas, cortando de manera natural la superficie freática. Ambos surgen en el contacto entre las unidades carbonatada superior y la carbonatada detrítica arcillosa, que actúa como límite con la unidad yesífera.

## 2.2. Datos climáticos

Se han utilizado los datos climáticos del observatorio meteorológico que el Instituto Nacional de Meteorología tiene en Aranjuez-Escuela de horticultura, Estación n° 3-100 A, situada a una latitud 40-02 N, longitud 00-05 E y altitud 490 m. Esta estación dispone de una serie de años suficientemente larga y representativa de años meteorológicos medios, con datos de precipitación y de evapotranspiración potencial, significativos para la realización del balance hídrico del suelo en periodos medios (Tabla 2). La determinación del balance hídrico a partir de datos medios mensuales es adecuado para los objetivos propuestos.

**Tabla 2.** Datos climáticos medios mensuales

	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Febr	Mar	Ab	May	Jun	Julio	Ago	Total
P	45	51	49	49	34	45	40	53	43	23	7	9	448
T <sup>a</sup>	19,2	13,8	8,5	5	5,1	6,5	9,5	12,3	15,9	20,3	23,8	23	13,6
ETP	89	51	22	10	11	15	32	50	81	115	147	130	753

### Resumen de datos climáticos.

- Temperatura medias mensual más baja: 5° C en diciembre.
- Temperatura mensual media más elevada: 23,8 °C en julio.
- Temperatura anual media: 13,6 °C.
- Precipitación media anual: 448 mm.
- Evapotranspiración potencial anual: 753 mm.

### 2.3. Balance hídrico del suelo en periodos medios

El balance hídrico analiza, cuantificando en la medida de lo posible, qué cantidad de agua se infiltra y cuanta se queda retenida en los niveles más superficiales o bien se evapora. Este tipo de balances tienen especial utilidad para determinar la recarga de acuíferos en periodos climáticos medios.

### 2.4. Cálculo del coeficiente de escorrentía

La determinación del coeficiente de escorrentía de áreas pequeñas y desconectadas de cursos fluviales donde no existen aforos, frecuentemente presenta ciertas dificultades. Para ello, el *United States Soil Conservation Service* (USSCS, 1972), propone el método llamado "de los números de escorrentía". El método determina la precipitación efectiva " $Pe$ ", a partir de la precipitación total " $P$ " y del número de escorrentía " $N$ ". La precipitación efectiva se determina bien gráficamente o mediante la aplicación de la siguiente expresión algebraica (Ec.1):

$$Pe = (P - 508/N + 5,08)^2 / (P + 2032/N - 20,32) \quad (\text{Ec. 1})$$

El número de escorrentía " $N$ ", se obtiene a partir de unas tablas, que tienen en cuenta el del tipo de suelo, cobertura vegetal, pendiente del terreno y la precipitación previa a la estudiada.

A partir del valor de precipitación efectiva obtenido, el coeficiente de escorrentía puede calcularse como (Ec. 2):

$$Ce = Pe/P \quad (\text{Ec. 2})$$

### 2.5. Cálculo de la permeabilidad con el "permeámetro de Guelph"

El permeámetro o infiltrómetro de Guelph es un instrumento que consta de dos tubos concéntricos de diferentes diámetros. Uno actúa como depósito de agua, y el otro de menores dimensiones que se pone en contacto con el suelo, lleva acoplado un sistema que permite mantener una carga hidráulica constante.

Figura 2. Permeámetro de Guelph y ensayo de campo.



El método para determinar la permeabilidad es muy sencillo y consta de los siguientes pasos:

- Se perfora un orificio en el suelo de unos 15 cm de profundidad.
- Se llena el depósito de agua y se cierra para crear el vacío.
- Se introduce el cilindro de menor diámetro en el orificio del suelo.
- Se abre el émbolo de la parte superior y se realizan lecturas del flujo para dos cargas hidráulicas constantes, de 5 y 10 cm.

El método de cálculo utilizado para determinar la infiltración ha sido el propuesto por Reynolds y Elrick (1985). Estos autores determinan la infiltración considerando un régimen estacionario, mediante la siguiente ecuación (Ec.3):

$$K_{\text{guelph}} = 60 (D_p^2 / (D_o^2 + 4D_o H_2)) * Q \quad (\text{Ec.3})$$

Donde  $K_{\text{guelph}}$  es la infiltración en mm/h;  $D_p$  el diámetro del permeámetro en cm;  $D_o$  el diámetro del pozo de muestreo en cm;  $H_2$  es la carga hidráulica utilizada en la medición y  $Q$  es el flujo a intensidad constante en condiciones de estado estacionario (mm/min).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Interpretación hidrogeológica

Se trata de un acuífero carbonatado que tiene un espesor de unos 35 metros. En la zona interior de esta paramera, el nivel freático se encuentra a unos 20 o 25 metros de profundidad. El empleo de pozos para la extracción de agua subterránea es muy poco frecuente en los alrededores de la zona de estudio, debido a los pequeños caudales que se obtienen y al progresivo descenso del nivel freático que se viene produciendo año tras año.

La recarga del acuífero se produce por infiltración directa del agua de lluvia que cae sobre toda la superficie del páramo y depende de la reserva de saturación considerada según se explica en el balance hídrico del apartado siguiente.

Localmente, la componente del flujo subterráneo es radial hacia los bordes norte y oeste, donde el acuífero se drena de forma natural a través de manantiales que surgen en los barrancos periféricos según se ha podido constatar con el inventario de puntos de agua.

Regionalmente del flujo subterráneo tiene sentido hacia el sur, drenándose por los arroyos Meigor y Cederrón (IGME 1985b).

La alternancia de calizas y margas, así como su desigual distribución espacial, hace que el acuífero tenga una permeabilidad muy variable, por zonas, pudiendo encontrarse también ligeras diferencias de la cota del nivel freático.

#### 3.2. Balance hídrico del suelo en periodos medios

En la Tabla 3 se representan las fichas hídricas en varios supuestos de reserva de saturación o capacidad de campo del suelo, es decir, se analiza la cantidad de agua que se puede infiltrar dependiendo de la capacidad que tenga la cobertura superficial de retener agua. Según la descripción de las calicatas que Geoestudios, S.A. (2006) realiza en el Anejo 2, por su litología y espesores, resulta razonable atribuir a esos materiales una capacidad de campo elevada incluida en el intervalo de entre 75 y 150 mm.

**Tabla 3.** Balance hídrico del suelo en diferentes hipótesis de reserva de saturación

FICHA HÍDRICA PARA UNA RESERVA DE SATURACIÓN DE 75 mm													
	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Julio	Ago	Total
V.Res.	0	0	27	39	9	0	0	0	-38	-37	0	0	
Res.	0	0	27	66	75	75	75	75	37	0	0	0	
ETR	45	51	22	10	11	15	32	50	81	60	7	9	393
Déficit	44	0	0	0	0	0	0	0	0	55	140	121	360
Exso	0	0	0	0	14	30	8	3	0	0	0	0	55

  

FICHA HÍDRICA PARA UNA RESERVA DE SATURACIÓN DE 100 mm													
	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Febr	Mar	Abr	May	Jun	Julio	Ago	Total
V.Res.	0	0	27	39	23	11	0	0	-38	-62	0	0	
Res.	0	0	27	66	89	100	100	100	62	0	0	0	
ETR	45	51	22	10	11	15	32	50	81	85	7	9	418
Déficit	44	0	0	0	0	0	0	0	0	30	140	121	335
Exso	0	0	0	0	0	19	8	3	0	0	0	0	30

  

FICHA HÍDRICA PARA UNA RESERVA DE SATURACIÓN DE 150 mm													
	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Febr	Mar	Abr	May	Jun	Julio	Ago	Total
V.Res.	0	0	27	39	23	30	8	3	-38	-92	0	0	
Res.	0	0	27	66	89	119	127	130	92	0	0	0	
ETR	42	51	22	10	11	15	32	50	81	115	7	9	448
Déficit	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	140	121	305
Exso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Desde un punto de vista conceptual si por ejemplo analizamos el supuesto para una reserva de suelo de 100 mm, vemos que la reserva empieza a formarse a mediados de octubre y a principio de febrero se alcanza la reserva de saturación. Comienza a disminuir a mediados de mayo y a finales de julio se produce el agotamiento de la reserva de agua en el suelo. Es decir, la infiltración desde la cobertera superficial hacia el subsuelo se iniciará en febrero y dejará de producirse a mediados de mayo. A partir de mayo el tiempo de permanencia del agua en la zona no saturada dependerá de la abundancia de las fracciones más o menos arcillosas que atraviese. Obviamente esta descripción corresponde a una situación media que puede variar ligeramente de un año a otro.

Lo anteriormente expuesto, viene a decir, que en general son las lluvias de invierno y primavera las que alimenta los ríos y acuíferos, siendo por tanto las estaciones en las que se produce mayor escorrentía superficial y subterránea. Que se produzca una u otra en mayor o menor medida, está relacionado con la permeabilidad del substrato geológico y con la pendiente topográfica. En la zona de estudio, parece que la escorrentía subterránea puede ser muy significativa, debido a la horizontalidad de la finca y a la aparente alta carstificación de las calizas. En términos del balance, la escorrentía total (superficial y subterránea) viene determinada por el exceso (datos mensuales y total anual).

De las tres hipótesis de reserva de saturación, el supuesto que supondría una mayor infiltración, sería para una reserva de 75 mm.

La situación teórica en la que se produce menos infiltración corresponde a una reserva de saturación de la cobertera de 150 mm, donde toda el agua queda retenida en el suelo y no se produce escorrentía ni superficial ni subterránea.

En la Tabla 4 se han incluido los datos del caso extremo de una superficie rocosa del terreno sin nada de cobertera superficial (reserva de saturación 0 mm). En esa situación, el porcentaje del exceso que pase a infiltración o bien a escorrentía superficial, dependerá del grado concreto de carstificación que presente la zona que se haya quedado desprovista de suelo. Según las observaciones geológicas llevadas a cabo, la carstificación en la zona parece ser muy alta.

**Tabla 4.** Balance hídrico del suelo para una reserva de saturación de 0 mm

	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Julio	Ago	Total
ETR	45	51	22	10	11	15	32	50	43	23	7	9	318
Exso	0	0	27	39	23	30	8	3	0	0	0	0	130

### 3.3 Coeficiente de escorrentía por el "método de los número de escorrentía"

La determinación del coeficiente de escorrentía se ha calculado para una precipitación máxima diaria de 56 mm, correspondiente a la precipitación máxima para un periodo de retorno de 10 años.

Según la descripción geológica de las calicatas realizadas por Geoestudios, S.A. (2006), texturalmente podemos clasificar los materiales más superficiales como pertenecientes al grupo B, "arenas finas y limos", o como del grupo C, "Arenas muy finas, limos y suelos con alto contenido de arcilla". La determinación de  $N$  se realiza entrando con estos grupos en otra tabla, que tiene en cuenta la pendiente del terreno y el uso de la tierra. Por las características de la parcela y para determinar  $N$  se han considerado suelos de los grupos B y C, con una pendiente inferior al 1 % y sin cultivos. En dichas condiciones, obtenemos; para suelos del grupo B una  $N$  de 58, y para suelos del grupo C un valor de  $N$  de 71. Aplicando el método numérico (Ec.1), para una precipitación máxima diaria de 5,6 cm se obtiene:

Para  $N$  de 58:  $Pe = 0,18$  cm y  $Ce = 0,032$ .

Para  $N$  de 71:  $Pe = 0,89$  cm y  $Ce = 0,15$ .

Si se tienen en cuenta las condiciones de humedad del suelo, previas a la precipitación analizada,  $N$  debe corregirse según unos datos tabulados. Las correcciones se aplican en los dos siguientes supuestos; que la altura de precipitación acumulada cinco días antes ( $II_5$ ) de la fecha en cuestión sea inferior a 2,5 cm, o superior a 5 cm. En la situación intermedia no se realiza corrección.

Aplicando dichas correcciones:

Para  $N$  de 58 y  $II_5$  inferior a 2,5 cm:  $N_{\text{corregida}} = 38$ ,  $Pe = 0,19$  cm y  $Ce = 0,033$ .

Para  $N$  de 58 y  $II_5$  superior a 5 cm:  $N_{\text{corregida}} = 77$ ,  $Pe = 1,43$  cm y  $Ce = 0,25$ .

Para  $N$  de 71 y  $II_5$  inferior a 2,5 cm:  $N_{\text{corregida}} = 51$ ,  $Pe = 0,02$  cm y  $Ce = 0,003$ .

Para  $N$  de 71 y  $II_5$  superior a 5 cm:  $N_{\text{corregida}} = 85$ ,  $Pe = 2,41$  cm y  $Ce = 0,4$ .

Es decir, el coeficiente de escorrentía obtenido que dependiendo de la litología (grupo B o grupo C) y de las condiciones iniciales de saturación del suelo puede oscilar entre 0,003 y

máximo de 0,4. El coeficiente de escorrentía de la zona indica valores acordes con una zona de topografía plana que favorece la permanencia de agua en el suelo.

### 3.4. Ensayos de permeabilidad de Guelph

En la Tabla 5 se presentan los resultados de los ensayos de permeabilidad que se han realizado en la zona de estudio, distribuidos homogéneamente en una superficie de una hectárea. Todos los ensayos se han determinado en régimen permanente, alcanzado después de unos 15 minutos desde el inicio del ensayo. Los parámetros fijos empleados han sido:  $D_p = 2,5$  cm,  $D_o = 7$  cm,  $H_5 = 5$  cm,  $H_{10} = 10$  cm.

Los resultados de los ensayos de permeabilidad en las formaciones superficiales indican que para una carga hidráulica de 5 cm, la permeabilidad de Guelph está comprendida entre 8,25 mm/h y 18,9 mm/h, y para una carga hidráulica de 10 cm, la permeabilidad oscila entre 43,42 mm/h y 65,26 mm/h.

Tabla 5. Valores medidos y calculados en los ensayos de permeabilidad.

<b>Ensayo 1</b>	Q para $H_5 = 4,5$ mm/min; Q para $H_{10} = 21$ mm/min;	$K_{\text{guelph}} = 17,01$ mm/h $K_{\text{guelph}} = 52,71$ mm/h
<b>Ensayo 2</b>	Q para $H_5 = 3,7$ mm/min; Q para $H_{10} = 18,7$ mm/min;	$K_{\text{guelph}} = 13,98$ mm/h $K_{\text{guelph}} = 46,9$ mm/h
<b>Ensayo 3</b>	Q para $H_5 = 5$ mm/min; Q para $H_{10} = 26$ mm/min;	$K_{\text{guelph}} = 18,9$ mm/h $K_{\text{guelph}} = 65,26$ mm/h
<b>Ensayo 4</b>	Q para $H_5 = 2,28$ mm/min; Q para $H_{10} = 17,3$ mm/min;	$K_{\text{guelph}} = 8,61$ mm/h $K_{\text{guelph}} = 43,42$ mm/h
<b>Ensayo 5</b>	Q para $H_5 = 4,6$ mm/min; Q para $H_{10} = 26$ mm/min;	$K_{\text{guelph}} = 16,25$ mm/h $K_{\text{guelph}} = 65,26$ mm/h

Notas: Q(mm/min) = flujo a intensidad constante en condiciones de estado estacionario.  
 $K_{\text{guelph}}$  (mm/h) = infiltración.

## 4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El substrato geológico del área de estudio está constituido por una unidad carbonatada, formada por costras de caliza margosa de estructura brechoide, que alternan con niveles arenosos, arcillosos y de calizas margosas de aspecto conglomerático. Presentan una carstificación elevada. La cobertera superficial está formada por arenas, limos y arcillas.

La zona de estudio se localiza en el borde noroccidental del Sistema Acuífero nº 20, Mesa de Ocaña. En el área de estudio, el espesor medio del acuífero se estima en unos 35 metros. El nivel freático en la zona se sitúa a una profundidad variable de entre unos 20 o 25 metros, medidos desde la superficie topográfica.

El coeficiente de escorrentía y las permeabilidades obtenidas garantiza la infiltración, en pocas horas, de la precipitación máxima en 24 horas de 56 mm, definida para un periodo de retorno de 10 años.

El estudio del movimiento del agua en el suelo combinando métodos numéricos teóricos como son el balance hídrico del suelo y la determinación del coeficiente de

escorrentía, con medidas in situ de permeabilidad directamente en campo, suministran una información bastante completa sobre el comportamiento del agua en el suelo que facilite su gestión para diferentes usos. Debido a la gran variabilidad que presentan los suelos en la naturaleza, incluso en zonas próximas, las determinaciones realizadas en campo con el permeámetro Guelph han sido muy satisfactorias.

## 5. REFERENCIAS

- ALMARZA C. (1987). "Fichas hídricas normalizadas y otros parámetros hidrometeorológicos". Instituto Nacional de Meteorología.
- ANGULO-JARAMILLO, R., VANDERVAERE, J. P., ROULIER, S., THONY, J.L., GAUDET, J. P. and VAUCLIN, M. (2000). Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers. A review and recent developments. *Soil and Tillage Research*, 55: 1-29.
- BOSCH, D. D. and WEST, L.T., (1998). Hydraulic conductivity variability for two sandy soils. *Soil Science Society of America Journal*, 62: 90-98.
- BYERS, E. y B. D. STEPHENS, (1983). Statistical and stochastic analysis of hydraulic conductivity and particle size in a fluvial sand. *Soil Science Society of America Journal*, 47: 1072-1080.
- DGOH-ITGE (1988). "Estudio de delimitación de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares, y síntesis de sus características". Dirección General de Obras hidráulicas e Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid, 58 pp.
- GARCÍA RODRÍGUEZ M., y GARCÍA RODRÍGUEZ C., (2004). Características hidrogeológicas del borde occidental de la Mesa de Ocaña en Yepes (Toledo). *Tecnología y Desarrollo*, Vol. II, 2004.
- GEOESTUDIOS, S.A. (2006). "Proyecto básico de infraestructura, vía e instalaciones de seguridad para las instalaciones de maquinaria de vía de Ferrovial-Agroman en Ocaña (Toledo)". Anejo 2. Geología y geotecnia.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (2000). "Mapa Topográfico Nacional de España 1:25.000. Ocaña, nº 631-I. I.G.N.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA, IGME (1985). "Mapa Geológico de España 1:50.000. Ocaña, Hoja nº 631". Impreso por el Serv. Geográfico del Ejército. Memoria + mapa.
- REYNOLDS, W.D. and ELRICK, D.E. (1985). The constant head well permeameter: effect of unsaturated flow. *Soil Science*, 139: 172-180.
- REYNOLDS, W.D. and ELRICK, D.E. (1987). A laboratory and numerical assessment of the Guelph permeameter method. *Soil Sci.* 144: 282-299.
- REYNOLDS, W. D., (1993). Saturated hydraulic conductivity: Field measurement. In: M. R. Carter (ed.). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis Publ. Boca raton. FL. USA.
- THORNTHWAITE, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geologic. Rev*, 38:55-94.
- UNITED STATES SOIL CONSERVATION SERVICE (1972): *National Engineering Handbook*, sec 4, sup. A, Hydrology.
- VAUCLIN, M., ELRICK, D. E. THONY, J. L., VACHAUD, G. and RUELLE, PH. (1994). Hydraulic conductivity measurements of the spatial variability of a loamy soil. *Soil Technology*, 7: 181-195.
- VIEIRA, S.R., HATFIELD, J.L., NIELSEN, D.R. and BIGGAR, J.W. (1983). Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, Berkeley, 51 (3): 1-75.