



Representación gráfica  
de los parámetros actual

de  
automat

9-9003) Interpretación por Cooper-Brederhoft-Papa

Valores calculados

Cálculo del error

Variable	Iteración	Optimo	ECM
1	1		8.985E-02
2	1		1.650E-02
3	1		1.088E-02
4	1		1.087E-02
1	2		1.063E-02
2	2		1.063E-02
1	1		1.07E-02
2	1		1.07E-02
1	2		1.07E-02
2	2		1.07E-02
1	1		1.07E-02
2	1		1.07E-02

# SlugIn 1.0

APLICACIÓN PARA LA INTERPRETACIÓN  
DE ENSAYOS SLUG



**Dirección técnica:**

Sergio Martos Rosillo (Instituto Geológico y Minero de España)

**Autores:**

Alberto Padilla Benítez (Aljibe Consultores)

Joaquín Delgado Pastor (Aljibe Consultores)

Antonio Azcón González de Aguilar (Instituto Geológico y Minero de España)

Sergio Martos Rosillo (Instituto Geológico y Minero de España)

Edita: Instituto Geológico y Minero de España

C/ Río Rosas, 23 - 28003 Madrid

[www.igme.es](http://www.igme.es)

Catálogo general y venta de las publicaciones de la Administración General del Estado en:

<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

ISBN en DVD: 978-84-7840-983-9

ISBN en línea: 978-84-7840-984-6

NIPO en DVD: 728150287

NIPO en línea: 728150271

Depósito legal en DVD: M-32686-2015

Depósito legal en línea: M-32687-2015

Imprime: Soluciones Gráficas Chile, S.L.L.

C/. Chile, 27 - 28016 MADRID

[info@graficaschile.es](mailto:info@graficaschile.es)

La correcta evaluación de los parámetros hidráulicos de un acuífero es la base sobre la que se sustenta su conocimiento hidrogeológico, y resulta indispensable para abordar infinidad de aspectos relativos al uso y a la preservación de la calidad del agua subterránea. El régimen de bombeo adecuado de un acuífero, la distancia óptima entre pozos de bombeo, el dimensionamiento de los perímetros de protección, la caracterización de zonas contaminadas, la evolución de los penachos de contaminación, etc., son aspectos cotidianos de los estudios hidrogeológicos que encuentran en la carencia del conocimiento de los parámetros hidráulicos de las formaciones acuíferas el principal obstáculo para conseguir resultados fiables.

Los ensayos slug consisten en una técnica muy utilizada para la evaluación de los parámetros hidráulicos de los acuíferos. En este sentido, se debe subrayar que aunque no sustituyen la representatividad de los resultados que se consiguen con los tradicionales ensayos de bombeo, su correcta ejecución e interpretación permite, de forma mucho más rápida y económica que con las pruebas de bombeo, obtener valores de los parámetros hidráulicos de los acuíferos en medios de todo tipo de permeabilidad.

La aplicación **SlugIn 1.0**, programa para la Interpretación de ensayos **Slug**, nace con la necesidad, por parte del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), de disponer de una herramienta de cálculo para la interpretación de los ensayos de permeabilidad en sondeos y/o pozos.

Con la difusión de la aplicación **SlugIn 1.0**, el Instituto Geológico y Minero de España pretende poner a disposición del colectivo de profesionales dedicados a la hidrogeología y a la ingeniería geológica, una herramienta con la que mejorar y revitalizar la información relativa a los parámetros hidráulicos de los acuíferos, incorporándola a las bases de datos hidrogeológicos nacionales y provinciales, que servirán de apoyo a la investigación hidrogeológica consiguiendo un mejor conocimiento hidrogeológico de una región.

El software que se presenta ofrece un entorno amigable de fácil aplicación para aquellos hidrogeólogos no expertos en programación y tanto la aplicación como su manual se presentan en lengua castellana, con objeto de cubrir la carencia de códigos de esta temática en este idioma.



	<b>Página</b>
<b>1.- INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>2.- METODOLOGÍA.....</b>	<b>11</b>
2.1.- ENSAYOS CON NIVEL VARIABLE .....	11
2.1.1.- Método de Cooper, Bredehoeft y Papadopulos .....	12
2.1.2.- Método de Hvorslev .....	15
2.1.3.- Método de Bouwer y Rice .....	18
2.1.4.- Ensayos slug en materiales de alta conductividad hidráulica	20
2.2.- ENSAYOS CON NIVEL CONSTANTE.....	22
2.2.1.- Ensayo de Lefranc.....	22
2.2.2.- Ensayo de Gilg-Gavard.....	23
2.3.- CORRECCIONES Y VALIDACIÓN DE LOS MÉTODOS .....	23
2.3.1.- Corrección de Bouwer .....	23
2.3.2.- Corrección de Chapuis.....	24
2.3.3.- Acuíferos anisótropos.....	25
2.3.4.- Efecto piel.....	25
2.3.5.- Validación en pozos de gran diámetro .....	27
<b>3.- REQUERIMIENTOS E INSTALACIÓN .....</b>	<b>31</b>
<b>4.- DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN .....</b>	<b>33</b>
4.1.- PÁGINA PRINCIPAL.....	33
4.2.- SUBFORMULARIOS .....	37
4.3.- GRÁFICO .....	42
4.4.- GENERACIÓN DE INFORMES.....	45
<b>5.- TUTORIAL.....</b>	<b>47</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>55</b>



Los ensayos de valvuleo también conocidos como de cuchareo, o más comúnmente mediante el anglicismo “slug test” son una técnica muy empleada para la estimación “in situ” de las propiedades hidráulicas de los acuíferos. Este tipo de ensayos se realizan midiendo el ascenso o la recuperación del nivel en un pozo y/o sondeo abierto en el que se ha generado un cambio instantáneo de su nivel piezométrico.

Los ensayos slug se han empleado tradicionalmente en ingeniería geológica, hidrogeología y en especial en ingeniería de petróleo y es a partir de la década de los ochenta del siglo XX cuando los ensayos slug pasan a ser una técnica habitual en los estudios hidrogeológicos (Todd y Mays, 2005). Este hecho coincide con el auge de los estudios de caracterización de emplazamientos contaminados (Kruseman y Raider, 1989; Chirlin, 1990), dado que en algunos casos no es conveniente movilizar grandes cantidades de agua, como ocurre al hacer ensayos de bombeo, y con la realización de estudios en medios de baja permeabilidad para el almacenamiento de residuos tóxicos (Carrera *et al.* 1987). En la actualidad, también son muy empleados para la obtención de parámetros hidráulicos durante el inventario de puntos de agua, con objeto de obtener una información distribuida espacialmente de estos parámetros para su posterior incorporación en modelos de flujo. Distintos autores (Butler, 1997; Fetter, 2001), ponen de manifiesto que el aumento del uso de esta técnica de caracterización se debe al menor coste y al menor tiempo necesario para su ejecución, respecto a los tradicionales ensayos de bombeo.

Entre la abundante bibliografía existente en la que se describe el diseño, la ejecución e interpretación de los ensayos slug destaca la guía elaborada por James J. Butler, del Servicio Geológico de Kansas (Butler, 1997). En este trabajo se deben destacar, entre otros aspectos, una serie de recomendaciones para ejecutar de forma correcta los ensayos slug.

En esencia, la ejecución de los ensayos slug consiste en provocar una rápida perturbación del nivel piezométrico y en medir su posterior recuperación respecto a las condiciones previas. La citada perturbación del nivel se puede realizar mediante a) la incorporación súbita de un cuerpo sólido bajo el nivel piezométrico, normal-

mente se emplean tubos de PVC lastrados o rellenos de arena, b) la inyección de aire comprimido en un pozo con cabezal cerrado, y c) la inyección o detracción de un pequeño volumen de agua en un tramo de sondeo obturado (Butler, 1997).

En relación con lo anterior, se debe indicar que cuando el ensayo se realiza en un tramo aislado del sondeo la denominación del ensayo es diferente, de forma que a este tipo de pruebas se les denomina ensayos pulso (cuando se inyecta un pequeño volumen de agua) o de producción (cuando se detrae).

En opinión de Buttler (1997), a) la utilización de un cuerpo sólido para la realización de ensayos slug es recomendable cuando el nivel piezométrico está a poca profundidad, en pozos de gran diámetro, en formaciones con permeabilidades de moderadas a bajas y cuando la rejilla del pozo se encuentra en su totalidad bajo el nivel piezométrico; b) la inyección de aire comprimido para provocar un cambio del nivel piezométrico se aconseja cuando el nivel está profundo y en formaciones de moderada a alta permeabilidad; y c) la utilización de obturadores para hacer los ensayos por tramos se recomienda en los medios de baja permeabilidad, en acuíferos fracturados, o bien cuando se quiere estudiar, por tramos, la variabilidad de la permeabilidad a lo largo del sondeo.

Con la aplicación informática que se presenta, **SlugIn 1.0**, se pretende facilitar el trabajo de interpretación de los ensayos slug, si bien también se han incorporado en el código diferentes fórmulas que permiten la interpretación de pruebas de inyección a nivel constante. Por otro lado, como la solución analítica más empleada para resolver tanto los ensayos slug como los ensayos pulso es la de Cooper *et al.* (1967), se han hecho una serie de consideraciones en la arquitectura del programa que permiten la interpretación de diferentes ensayos pulso o slug a lo largo de un sondeo.

Esta herramienta permite al usuario las siguientes utilidades:

- Organizar una base de datos específica de ensayos slug estructurada y jerarquizada en *Proyecto* → *Sondeos* → *Ensayos* → *Interpretaciones*.
- Facilitar al técnico la interpretación de los ensayos utilizando varios métodos comparando, sobre representaciones gráficas, los valores medidos con diferentes resultados analíticos obtenidos al modificar por el método directo los parámetros hidráulicos.
- Estimación automática de los parámetros hidráulicos con los que mejor se ajustan los valores medidos a los resultados analíticos obtenidos mediante la aplicación de diferentes métodos de interpretación.

Los métodos de interpretación que el usuario dispone en la aplicación son los siguientes:

### **Ensayos con nivel variable**

#### ***Método de Cooper, Bredehoeft y Papadopoulos***

- Campo de aplicación: Sondeos totalmente penetrantes en acuíferos confinados.
- Admite corrección de Bower (acuíferos libres).
- Admite la corrección del efecto piel.
- Variables a calcular: T y S.

#### ***Método de Hvorslev***

- Campo de aplicación: Acuíferos libres y confinados.
- Admite corrección de Bower (acuíferos libres).
- Admite corrección de Chapuis (con tapón de fondo).
- Variables a calcular: k y b (punto de corte con ordenadas).

#### ***Método de Bouwer y Rice***

- Campo de aplicación: Acuíferos libres con buenos resultados en confinados. Sondeos total o parcialmente penetrantes.
- Admite corrección de Bower (acuíferos libres).
- Admite corrección de Chapuis (con tapón de fondo).
- Variable a calcular: k y b (punto de corte con ordenadas).

#### ***Método para materiales de alta conductividad***

- Campo de aplicación: Acuíferos confinados y libres.
- Admite corrección de Bower (acuíferos libres).
- Variables a calcular: k y Le.

### **Ensayos con nivel constante.**

Variable a calcular k.

- ***Lefranc***
- ***Gilg-Gavard***

Por último, se debe indicar que en este código se ha incorporado el test de Mace (1999) con el que se puede determinar la fiabilidad de los resultados obtenidos al realizar ensayos slug en pozos de gran diámetro.

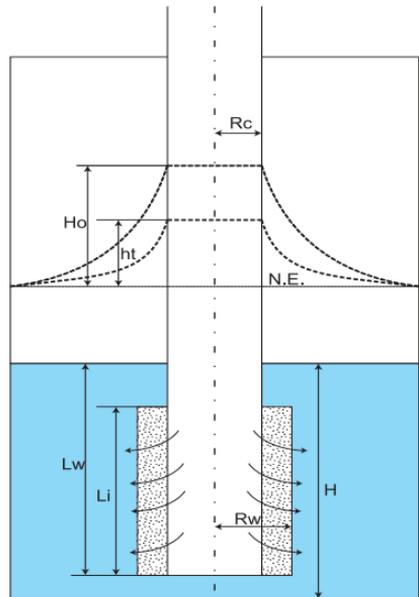


### 2.1. ENSAYOS CON NIVEL VARIABLE

Como ya se ha indicado, los ensayos de nivel variable se realizan modificando instantáneamente el nivel estático del acuífero en un sondeo, para, posteriormente medir su variación en el tiempo hasta alcanzar las condiciones estáticas. Durante el ensayo se suele medir para diferentes intervalos de tiempo ( $t$ ) la profundidad a que se encuentra el nivel del agua en el sondeo ( $P_t$ ). El ascenso residual ( $h_t$ ) corresponde a la diferencia entre el estático inicial ( $P_0$ ), antes de modificarlo, y el nivel medido:  $h_t = P_0 - P_t$ .

Usualmente todas las funciones aplicadas a los ensayos con nivel variable utilizan el ascenso residual relativo que es igual a la relación  $h_t/H_0$ , donde  $H_0$  es el ascenso inicial en el tiempo  $t=0$ , antes de comenzar la recuperación.

En los ensayos con nivel variable el programa permite obtener el conjunto de valores  $h_t/H_0$  teóricos en un intervalo de tiempo para unos valores de parámetros hidráulicos definidos por el usuario, resolviendo de forma directa por distintos métodos la función de



- N.E. nivel estático
- $H_0$  ascenso al inicio del ensayo ( $t=0$ )
- $h_t$  ascenso residual en el tiempo  $t$
- $R_c$  radio de la entubación
- $R_w$  radio de la zona filtrante
- $L_i$  longitud de la zona filtrante
- $L_w$  longitud sondeo en la zona saturada
- $H$  espesor saturado

Figura 2.1. Esquema de una perforación con las variables que intervienen en la aplicación.

descenso. En este caso, el usuario de forma interactiva, sobre una representación gráfica, podrá calcular que parámetros son los que mejor ajustan los ascensos calculados a las medidas de campo. No obstante, el programa también permite la estimación automática de los parámetros hidráulicos resolviendo de forma inversa por distintos métodos la función descenso. Posteriormente se podrá modificar la solución automática obtenida hasta fijar la que se considere conveniente.

En la **figura 2.1** se recoge un esquema de una perforación en la que se muestran todas las variables que intervienen en los métodos incluidos en la aplicación.

### 2.1.1. Método de Cooper, Bredehoeft y Papadopoulos

El objetivo al aplicar el método de Cooper *et al.*, (1967) consiste en la obtención de dos parámetros hidráulicos: la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento.

Se parte de la ecuación general:

$$\frac{h_t}{H_0} = F(\alpha, \beta)$$

donde:

$h_t$ , ascenso residual en el tiempo  $t$  (m)

$H_0$ , ascenso máximo en el tiempo  $t=0$  (m)

La función  $F(\alpha, \beta)$  tiene la siguiente expresión

$$F(\alpha, \beta) = \frac{8\alpha}{\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\left(\frac{\beta u^2}{\alpha}\right)}}{u \Delta u} du \quad (1)$$

donde:

$\alpha$ , parámetro de integración:

$$\alpha = \frac{R_w^2 S}{R_c^2}$$

$\beta$ , parámetro de integración:

$$\beta = \frac{T t}{R_c^2}$$

$R_c$ , radio de la entubación (m)  
 $R_w$ , radio de la zona filtrante (m)  
 $t$ , tiempo (s)  
 $S$ , coeficiente de almacenamiento  
 $T$ , transmisividad (m<sup>2</sup>/s)  
 $u$ , variable de integración  
 $\Delta u$ , es una función compleja:

$$\Delta u = [uJ_0(u) - 2\alpha J_1(u)]^2 + [uY_0(u) - 2\alpha Y_1(u)]^2$$

$J_0, J_1$  funciones de Bessel de primera especie y orden 0 y 1  
 $Y_0, Y_1$  funciones de Bessel de segunda especie y orden 0 y 1

### Solución del programa

La solución directa de la ecuación (1) consiste en obtener valores  $F(\alpha, \beta)$  introduciendo valores  $\alpha$  y  $\beta$ . Esta solución la puede obtener el programa de forma analítica resolviendo dicha ecuación.

Por otra parte, la solución inversa de la ecuación (1) consiste en, dado un conjunto de valores  $h_t$  vs  $t$  medidos y las condiciones del ensayo ( $R_c, R_w$  y  $H_0$ ), obtener el valor de los parámetros de la función que mejor se ajustan a dicha distribución. La aplicación calcula estos parámetros aplicando el método del gradiente. Por este método se pretende obtener de forma iterativa el valor de los parámetros que minimizan la función de error cuadrático medio (FE) entre los valores medidos y los calculados.

$$FE = \sum_{t=1}^n \sqrt{\left( \frac{h_t}{H_0} - \frac{h^*_t}{H_0} \right)^2}$$

donde:

- $n$ , número de valores de ascenso residual medido en cada tiempo ( $t$ )
- $h_t$ , ascenso residual medido en el ensayo (m)
- $h^*_t$ , ascenso residual calculado mediante la solución directa (m)

El método del gradiente consiste en una aproximación iterativa mediante la resolución del sistema de ecuaciones resultante al desarrollar, en series de Taylor, la primera derivada parcial de la función respecto a cada uno de los parámetros e igualando a cero:

$$\frac{\partial FE}{\partial P_i} = 0$$

En este caso, el conjunto de parámetros  $P_i$  que hay que estimar son dos: la transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S). De esta forma el sistema de ecuaciones resultante que hay que resolver en cada iteración tiene la forma:

$$\begin{bmatrix} \sum_{t=1}^n \left( \frac{\partial \frac{h_t}{H_0}}{\partial T} \right)^2 & \sum_{t=1}^n \frac{\partial \frac{h_t}{H_0}}{\partial T} \frac{\partial \frac{h_t}{H_0}}{\partial S} \\ \sum_{t=1}^n \frac{\partial \frac{h_t}{H_0}}{\partial S} \frac{\partial \frac{h_t}{H_0}}{\partial T} & \sum_{t=1}^n \left( \frac{\partial \frac{h_t}{H_0}}{\partial S} \right)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{t=1}^n \frac{\partial \frac{h_t}{H_0}}{\partial T} \left( \frac{h_t}{H_0} - \frac{h^*_t}{H_0} \right)^2 \\ \sum_{t=1}^n \frac{\partial \frac{h_t}{H_0}}{\partial S} \left( \frac{h_t}{H_0} - \frac{h^*_t}{H_0} \right)^2 \end{bmatrix}$$

donde:

$\Delta T$  y  $\Delta S$ , incremento de la transmisividad y del coeficiente de almacenamiento a calcular en cada iteración.

Debido a que la función (1) no es derivable, las derivadas parciales se realizan por métodos numéricos. Para ello se calculan por el método directo las variaciones en los ascensos residuales producidas por pequeños incrementos de los parámetros ( $P_i+0.01P_i$ ). La derivada parcial se puede entonces aproximar a:

$$\frac{\partial \frac{h_t}{H_0}}{\partial P_i} \approx \frac{\frac{h_t}{H_0} - \frac{h'_t}{H_0}}{0.01P_i}$$

donde:

$h_t/H_0$ , ascenso residual calculado con  $P_i$

$h'_t/H_0$ , ascenso residual calculado con  $P_i+0.01P_i$

Partiendo de un conjunto m de parámetros hidráulicos iniciales ( $P^0_m$ ), al inicio de cada iteración k el nuevo valor de cualquier parámetro i del conjunto de parámetros a optimizar viene dado por:

$$P_i^k = P_i^{k-1} + \Delta P_i$$

Como ya se ha indicado, la resolución de la función  $h_t/H_0$  ó  $F(\alpha,\beta)$  la puede realizar el programa de forma analítica, no obstante, dado que para obtener la interpretación de los datos de campo puede ser necesario realizar muchas iteraciones, además de que se tiene que resolver la derivada para obtener la solución óptima mediante incrementos, se ha incluido en el programa la posibilidad de resolverla interpolando entre una tabla de valores  $\alpha$  vs  $\beta$  previamente generados de forma analítica. Los límites de esta tabla son  $\alpha$  (1E-10 y 8E01) y  $\beta$  (1E-03 y 1E03). De esta forma la interpretación y obtención de los valores óptimos es mucho más rápida aunque algo menos precisa.

### 2.1.2. Método de Hvorslev (1951)

La solución de Hvorslev (1951) parte de la ecuación general:

$$\frac{h_t}{H_0} = \exp\left(\frac{-k t}{\pi R_c^2} F\right) \quad (2)$$

donde:

$h_t$ , ascenso residual en el tiempo  $t$  (m)

$H_0$ , ascenso máximo en el tiempo  $t=0$  (m)

$R_c$ , radio de la conducción (m)

$k$ , conductividad hidráulica (m/s)

$F$ , factor de forma (m)

La expresión más usual del factor de forma es la que corresponde a un elipsoide de penetración de agua. Tiene la siguiente expresión:

$$F = \frac{2\pi L_i}{L_i \ln \frac{R_w}{R_c}}$$

Al sustituirla en la expresión (2), la fórmula de Hvorslev toma la forma,

$$\frac{h_t}{H_0} = \exp\left(\frac{-2k L_i t}{R_c^2 L_i \ln \left(\frac{L_i}{R_w^2}\right)}\right)$$

donde:

$R_w$ , radio de la zona filtrante (m)

$L_i$ , longitud de la zona filtrante (m)

La fórmula empírica descrita está desarrollada para unas condiciones ideales del ensayo de permeabilidad, entre otras, para una inyección con forma esférica. Sin embargo, esto no es así porque ni el filtro es cilíndrico, ni la permeabilidad es isótropa, etc. Por lo que se han ideado diferentes factores de corrección a los que se les ha denominado factores de forma (F), que intentan formular la geometría de la zona de penetración del agua en la formación.

De manera general se podría formular el caudal de entrada de agua  $Q_t$  en el acuífero en un instante t como (Chapuis, 1989):

$$Q_t = F k h_t \quad (3)$$

donde:

$Q_t$ , caudal de entrada al acuífero en un instante t ( $m^3/s$ )

k, conductividad hidráulica (m/s)

F, factor de forma (m)

$h_t$ , carga hidráulica en el tiempo t (m)

En el caso de un ensayo en el que varía h, entre un intervalo de tiempo  $t_1$  y  $t_2$ ,  $Q_t = S(dh/dt)$ , la variación de h se puede escribir como la integral de la ecuación (3):

$$\ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = -Ck(t_1 - t_2)$$

donde:

C, es igual a  $C = F/S$  ( $m^2$ )

S, sección del pozo ( $m^2$ )

Existen numerosas fórmulas empíricas para definir el factor de forma que dependen de las condiciones del acuífero y del sondeo del ensayo.

En función de las condiciones del ensayo, para aplicar el método de Hvorslev se suelen utilizar expresiones del factor de forma que se recogen en el Cuadro 1.

### Solución del programa

Al igual que en el anterior método, el programa permite al usuario obtener la solución directa de la expresión (2), de manera que podrá estimar k de forma interactiva comparando la representación gráfica entre los valores calculados y los medidos.

Nº	OBSERVACIÓN	$L_i$	$L_w/H$	$k_v/k_h$	EXPRESIÓN ANALÍTICA
1	Isótropo Zona de recarga sólo por el fondo El fondo no toca el nivel del agua	0	0	1	$F = 4 R_w$
2	Isótropo Zona de recarga sólo por el fondo El fondo está dentro de la franja saturada Parcialmente penetrante	0	<1	1	$F = 5,5 R_w$
3	Isótropo Pozos de gran diámetro Equivalente a una recarga en forma de esfera (Schneebeli, 1954) Parcialmente penetrante	$<8R_w$	<1	1	$F = 4 \pi R_w \sqrt{\frac{L_i}{2R_w} + 0.25}$ (2)
4 <sup>(1)</sup>	Isótropo Pozos de pequeño diámetro Equivalente a una recarga en forma de elipsoide Parcialmente penetrante	$>8R_w$	<1	1	$F = \frac{2 \pi L_i}{\ln \frac{L_i}{R_w}}$
5 <sup>(1)</sup>	Anisótropo $m = \sqrt{k_h / k_v}$ Pozos de pequeño diámetro Equivalente a una recarga en forma de elipsoide Parcialmente penetrante	$>8R_w$	<1	$\neq 1$	$F = \frac{2 \pi L_i}{\ln \left[ \frac{m L_i}{2R_w} + \sqrt{1 + \left( \frac{m L_i}{2R_w} \right)^2} \right]}$
6 <sup>(1)</sup>	Anisótropo $m = \sqrt{k_h / k_v}$ Pozos de pequeño diámetro Equivalente a una recarga en forma de semielipsoide Totalmente penetrante	$>8R_w$	=1	$\neq 1$	$F = \frac{2 \pi L_i}{\ln \left[ \frac{m L_i}{R_w} + \sqrt{1 + \left( \frac{m L_i}{R_w} \right)^2} \right]}$

- (1) Estas expresiones admiten la corrección de Chapuis cuando tienen tapa de fondo:  $F_c = F - 5,5 R_w$ . Los factores de forma 5 y 6 también suelen usarse en materiales isótropos, en cuyo caso en la expresión  $m=1$ . De las expresiones 5 y 6, la más usada es la 5.
- (2) En Chapuis (1989) en el numerador aparece  $2\pi$  en lugar de  $4\pi R_w$ . Parece que se debe a una errata de Chapuis (Mace, 1999; Sánchez, 2011).

**Cuadro 1. Factores de forma empleados en el método de Hvorslev.  $H$ , espesor saturado del acuífero y  $L_w$  longitud del sondeo en el acuífero saturado.**

La estimación automática de k la obtiene la aplicación a partir de una serie de medidas de campo de  $h_t$  vs t y de las condiciones del ensayo ( $R_c, R_w, L$  y  $H_0$ ). El procedimiento seguido se describe a continuación.

La expresión (2) se puede representar de la siguiente forma:

$$\frac{h_t}{H_0} = e^{-\alpha t} \tag{4}$$

en la que

$$\alpha = \frac{kF}{\pi R_c^2}$$

Se puede calcular a partir de los datos de campo ajustándoles una recta de mínimos cuadrados a la representación  $y = \ln(h_t/H_0)$  vs t. En teoría esta recta debe pasar por el origen de coordenadas ( $\ln(1)$ ) pero normalmente la recta que mejor se ajusta suele cortar al eje de ordenadas en algún punto (b) distinto de cero. Por lo que la recta suele tener la forma:  $y = -\alpha t + b$ . Así pues serán necesarios dos parámetros de ajuste  $\alpha$ , y b.

La recta de mínimos cuadrados se calcula por las expresiones clásicas:

$$-\alpha = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

$$b = \frac{\sum Y + \alpha \sum X}{N}$$

Con el coeficiente de correlación:

$$R = \frac{\sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[N(\sum X)^2 - \sum X^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

Calculado  $\alpha$ , el valor de k vendrá dado por:

$$k = \frac{\alpha \pi R_c^2}{F}$$

### 2.1.3. Método de Bouwer y Rice

La expresión utilizada por Bower y Rice (1976) para obtener los ascensos residuales relativos es similar a la empleada para el método de Hvorslev:

$$\frac{h_t}{H_0} = \exp \frac{-k t}{\pi R_c^2} F$$

Pero en este método el factor de forma viene definido por las siguientes expresiones:

$$F = \frac{2 \pi L_i}{L \ln \left[ \frac{R_i}{R_w} \right]}$$

donde:

$R_i$ , radio de influencia del sondeo (m). No se puede estimar

$R_w$  radio de la zona filtrante (m)

$L_i$  longitud de la zona filtrante (m)

El  $\ln(R_i/R_w)$  se puede calcular mediante las siguientes expresiones empíricas:

Sondeo totalmente penetrante ( $L_w=H$ ):

$$\ln \frac{R_i}{R_w} = \frac{1}{\frac{1.1}{\ln \frac{L_w}{R_w}} + \frac{C}{\frac{L_i}{R_w}}}$$

Sondeo parcialmente penetrante ( $L_w < H$ ):

$$\ln \frac{R_i}{R_w} = \frac{1}{\frac{1.1}{\ln \frac{L_w}{R_w}} + \frac{A + B \ln \frac{H - L_w}{R_w}}{\frac{L_i}{R_w}}}$$

donde:

$L_w$  altura de la superficie freática desde el límite inferior del filtro (m)

$H$ , espesor saturado del acuífero libre (m)

En estas expresiones A, B y C son parámetros adimensionales que se podrían obtener mediante las siguientes expresiones analíticas:

Si  $x < 2.554422663$

$$A = 1.638445671 + 0.166908063 x + 0.000740459 \exp(6.17105281 x - 1.054747686 x^2)$$

Si  $x \geq 2.554422663$

$$A = 11.00393028 - 170.7752217 \text{ Exp}(-1.509639982 x)$$

Si  $x < 2.596774459$

$$B = 0.174811819 + 0.060059188 x + 0.007965502 \text{ Exp}(2.053376868 x - 0.007790328 x^2)$$

Si  $x \geq 2.596774459$

$$B = 4.133124586 - 93.06136936 \text{ Exp}(-1.435370997 x)$$

Si  $x < 2.200426117$

$$C = 0.074711376 + 1.083958569 x + 0.00557352 \text{ Exp}(2.929493814 x - 0.001028433 x^2)$$

Si  $x \geq 2.200426117$

$$C = 15.66887372 - 178.4329289 \text{ Exp}(-1.322779744 x)$$

Donde  $x = \log(L/R_w)$

## Solución del programa

Para obtener los parámetros hidráulicos, la aplicación utiliza el mismo procedimiento que el descrito cuando se aplica el método de Hvorslev. Es decir obtiene los coeficientes de la recta que mejor se ajusta a la distribución  $\ln(h_t/H_0)$  vs  $t$

### 2.1.4. Ensayos slug en materiales de alta conductividad hidráulica

Los ensayos slug realizados en materiales de alta conductividad, después del ascenso inicial, hasta recuperar las condiciones iniciales, se produce un fenómeno de amortiguación oscilatoria. Este fenómeno se puede expresar mediante la siguiente expresión (Kreysing, 1979):

Para  $C_D < 2$

$$\frac{h_t}{H_0} = \exp\left(-\frac{C_D}{2} t_d\right) \left[ \cos(\omega_d t_d) + \frac{C_D}{2\omega_d} \text{sen}(\omega_d t_d) \right] \quad (5)$$

Para  $C_D = 2$

$$\frac{h_t}{H_0} = \exp(-t_d) (1 + t_d) \quad (6)$$

Para  $C_D > 2$

$$\frac{h_t}{H_0} = \frac{1}{\beta_1 - \beta_2} [\beta_1 \exp(\beta_2 t_d) - \beta_2 \exp(\beta_1 t_d)] \quad (7)$$

donde:

$h_t$ , ascenso residual en el tiempo  $t$  (m)

$H_0$ , ascenso máximo en el tiempo  $t=0$  (m)

$t_d$ , tiempo normalizado (adimensional):

$$t_d = t \sqrt{\frac{g}{L_e}}$$

$g$ , aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$L_e$ , longitud efectiva de la columna de agua

$\omega_d$ , parámetro de frecuencia

$$\omega_d = \sqrt{1 - \left(\frac{C_D}{2}\right)^2}$$

$\beta_1, \beta_2$ , parámetros:

$$\beta_1 = -\frac{C_D}{2} - \omega_d, \quad \beta_2 = -\frac{C_D}{2} + \omega_d$$

Dependiendo del tipo de acuífero ensayado  $C_D$  tiene las siguientes expresiones:

a) Para acuíferos no confinados (modelo Bouwer y Rice):

$$C_D = \sqrt{\frac{g}{L_e}} \frac{R_c^2 L_n \frac{R_i}{R_w}}{2 L_i k}, \quad k = \sqrt{\frac{g}{L_e}} \frac{R_c^2 L_n \frac{R_i}{R_w}}{2 L_i C_D}$$

b) Para acuíferos confinados (modelo Hvorslev):

$$C_D = \sqrt{\frac{g}{L_e}} \frac{R_c^2 L_n \left[ \frac{L_i}{2R_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{L_i}{2R_w}\right)^2} \right]}{2 L_i k}, \quad k = \sqrt{\frac{g}{L_e}} \frac{R_c^2 L_n \left[ \frac{L_i}{2R_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{L_i}{2R_w}\right)^2} \right]}{2 L_i C_D} \quad (8)$$

donde:

$k$ , conductividad hidráulica (m/s)

$R_c$ , radio de la entubación (m)

$R_w$ , radio de la zona filtrante (m). En acuíferos anisótropos hay que sustituirlo por (Zlonik, 1994)

$$R_w \sqrt{k_v / k_h}$$

$R_i$ , radio de influencia del sondeo (m). No se puede estimar

$L_i$ , longitud de la zona filtrante (m)

Para estimar  $\ln(R_i/R_w)$  se pueden utilizar las expresiones indicadas en el método de Bouwer y Rice.

### Solución del programa

Al igual que en los métodos anteriormente descritos, la aplicación permite al usuario obtener la solución directa de la expresión (6), de manera que podrá estimar  $k$  de forma interactiva comparando la representación gráfica entre los valores calculados y los medidos. En este caso, además de las características del ensayo ( $R_c$ ,  $R_w$ ,  $R_i$ ,  $L_i$ ) deberá indicar dos parámetros hidráulicos, la conductividad ( $k$ ) y la longitud efectiva de la columna de agua ( $L_e$ ).

La estimación automática de los parámetros  $k$  y  $L_e$ , a partir de las condiciones del ensayo y de los valores de campo de  $h_t$  vs  $t$ , se realiza de forma iterativa aplicando el procedimiento del gradiente ya descrito en el método de Cooper, Bredehoeft y Papadopulos.

## 2.2. ENSAYOS CON NIVEL CONSTANTE

Los ensayos de nivel constante consisten en introducir un caudal constante para mantener el nivel del agua dentro del sondeo estabilizado a una altura  $h$  por encima del nivel estático. La interpretación del ensayo consiste en calcular la conductividad hidráulica ( $k$ ) a partir de las condiciones del ensayo y del caudal añadido aplicando diferentes expresiones analíticas. Los métodos de interpretación que recoge el programa se describen a continuación.

### 2.2.1. Ensayo de Lefranc

La altura piezométrica que se alcanza en un sondeo en el que se inyecta un caudal constante una vez estabilizado viene dada por la siguiente expresión:

$$h = \frac{Q}{Fk}$$

donde:

Q, caudal inyectado (m<sup>3</sup>/s)

h, altura de agua dentro del sondeo, por encima del nivel estático (m)

k, conductividad hidráulica (m/s)

F, factor de forma (elipsoide)

$$F = \frac{2\pi L_i}{L_i \ln \frac{L_i}{R_w}}$$

R<sub>w</sub>, radio de la zona filtrante (m)

L<sub>i</sub>, longitud de la zona filtrante (m)

A partir de las condiciones del ensayo y del caudal inyectado para estabilizar el nivel, la aplicación obtiene directamente la conductividad hidráulica.

### 2.2.2. Ensayo de Gilg-Gavard

Es similar al del Lefranc pero se aplica otro factor de forma. La expresión es:

$$h = \frac{Q}{Fk}$$

donde:

Q, caudal inyectado (m<sup>3</sup>/s)

h, altura de agua dentro del sondeo, por encima del nivel estático (m)

k, conductividad hidráulica (m/s)

L<sub>i</sub>, longitud de la zona filtrante (m)

R<sub>w</sub>, radio de la zona filtrante (m)

F, factor de forma:

para L<sub>i</sub>>6, F = 1,032 L<sub>i</sub> + 60 R<sub>w</sub>

para L<sub>i</sub>≤6, F = (1,032 L<sub>i</sub> + 60 R<sub>w</sub>) (-0,014 L<sub>i</sub><sup>2</sup> + 0,178 L<sub>i</sub> + 0,481)

## 2.3. CORRECCIONES Y VALIDACIÓN DE LOS MÉTODOS

### 2.3.1. Corrección de Bouwer

La corrección de Bouwer (1989) se suele aplicar cuando el nivel piezométrico oscila durante el ensayo en la zona de la rejilla. Es casi de obligada aplicación en

acuíferos libres cuando la tubería está ranurada en todo el acuífero. Esta corrección afecta al radio de la entubación:

$$R_{CA} = \sqrt{(1 - \eta)R_C^2 + \eta R_W^2}$$

donde:

$R_{CA}$ , radio de la entubación corregido (m)

$\eta$ , porosidad del empaque de gravas

$R_C$ , radio de la entubación (m)

$R_W$  radio de la zona filtrante (m)

Los métodos susceptibles de aplicar esta corrección son aquellos que se realizan con nivel variable:

- Cooper, Bredehoeft y Papadapulos
- Hvorslev
- Bouwer y Rice
- Materiales de alta permeabilidad

### 2.3.2. Corrección de Chapuis

Esta corrección afecta al factor de forma. Hay que aplicarla cuando el ensayo se realiza en sondeos que tienen tapa de fondo. Consiste en restar al factor de forma utilizado ( $F$ ) el que le corresponde cuando la descarga se efectúa solo por el fondo:

$$F_c = F - 5,5 R_W$$

donde:

$F$ , factor de forma elegido

$F_c$ , factor de forma corregido (m)

$R_W$  radio de la zona filtrante (m)

Se aplica en todos aquellos métodos en los que se utiliza el factor de forma:

- Hvorslev
- Bouwer y Rice
- Lefranc
- Gilg-Gavard

### 2.3.3. Acuíferos anisótropos

Esta corrección hay que aplicarla cuando la conductividad horizontal es sensiblemente diferente a la vertical.

Implícitamente ya va incorporada en las expresiones del factor de forma indicadas en el método de interpretación de Hvorslev (factores de forma nº 4, 5 y 6 del **cuadro 1**), pero también hay que aplicarlo en los ensayos en materiales de alta conductividad hidráulica (Zlonik, 1994):

$$R_{WA} = R_w \sqrt{k_v / k_h}$$

donde:

$R_{wC}$  radio de la zona filtrante corregido (m)

$R_w$  radio de la zona filtrante(m)

$k_v$  conductividad hidráulica vertical (m/s)

$k_h$  conductividad hidráulica horizontal (m/s)

### 2.3.4. Efecto piel

Este efecto se deriva de la anomalía que introduce la existencia de una posible zona en el entorno del sondeo con una conductividad hidráulica distinta a la de la formación (mayor o menor) debido a diferentes causas (desarrollo, colmatación, etc). Este efecto viene definido por:

$$\sigma = \left( \frac{k_f}{k_s} - 1 \right) Ln \frac{R_{eW}}{R_w}$$

donde:

$R_{eW}$  radio de la zona filtrante incluida la piel (m)

$K_f$  conductividad hidráulica de la formación (m/s)

$K_s$  conductividad hidráulica de la piel (m/s)

Si  $k_f > k_s$  el efecto piel ( $\sigma$ ) es positivo si  $k_f < k_s$  el efecto piel es negativo.

Según Ramey *et al.* (1975), si en la expresión (1), se sustituye el valor  $R_w$  por el del radio efectivo  $R_{eW} = R_w e^{-\sigma}$ , el conjunto de curvas  $F(\alpha, \beta)$  tiene una forma idéntica a las propuestas por Cooper *et al.* (1967). Una vez ajustadas se podría calcular T y S si se conoce  $R_{eW}$  o en su defecto  $\sigma$ .

El problema en los ensayos slug está en que no es habitual conocer  $\sigma$ , en cuyo

caso la interpretación de  $k$  ó  $S$  es ambigua puesto que la solución teórica de los descensos es muy similar considerando o no el efecto piel. Por ejemplo, en la **figura 2.2**, que recoge los valores teóricos de las variaciones de  $h/H_0$  con el tiempo obtenidos aplicando el método de Cooper, Bredehoeft y Papadopulos considerando un efecto piel de  $\sigma=-3$  y sin efecto piel ( $\sigma=0$ ), se obtienen las mismas variaciones. En el caso de considerar el efecto piel, para un coeficiente de almacenamiento de  $S = 5 \times 10^{-4}$ ; y sin considerar el efecto piel para un  $S = 1,9 \times 10^{-1}$ .

En la aplicación **SlugIn 1.0** se ha considerado el efecto piel de la misma forma que como se ha introducido cualquier otra corrección de los parámetros del ensayo (p.e. anisotropía o Chapuis). El usuario podrá introducir, o no, el efecto piel y obtener la solución correspondiente bien analítica o de interpretación automática. Posteriormente podrá modificarlo de forma interactiva con la aplicación hasta obtener la solución que considere mejor.

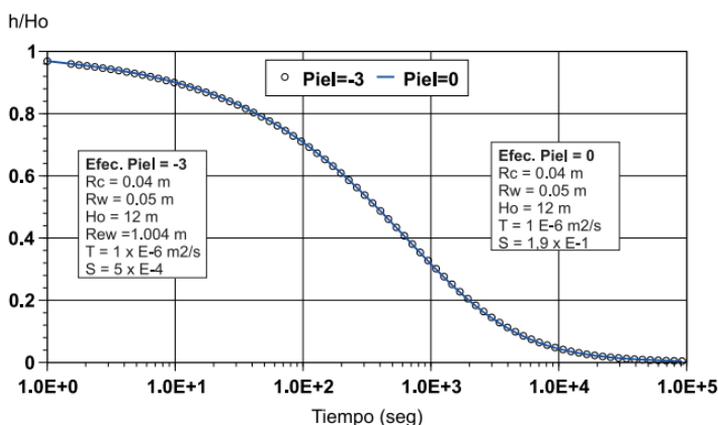


Figura 2.2. Evolución teórica de  $h/H_0$  obtenido aplicando el método de Cooper et al. considerando un efecto piel de  $\sigma=-3$  y sin considerar efecto piel ( $\sigma=0$ ). En ambos casos los resultados son idénticos pero en el primer caso con un  $S=5 \times 10^{-4}$  y en el segundo con un  $=1,9 \times 10^{-1}$ .

El efecto piel se incluye modificando el radio de la zona filtrante según la siguiente expresión:  $R_{ew}=R_w e^{\sigma}$ . Ya que  $R_w$  interviene en todos los métodos de interpretación incluidos en esta aplicación, el efecto piel también podrá incluirse en cualquiera de ellos.

### 2.3.5. Validación en pozos de gran diámetro

Sobre la base de varias experiencias en pozos de gran diámetro Mace, en 1999, desarrolló un test para conocer la fiabilidad de los resultados obtenidos al emplear ensayos slug en pozos de gran diámetro, normalmente construidos a mano.

El test propuesto por Mace está basado en definir sectores de mayor o menor fiabilidad de resultados en diagramas de distribución de valores de factor de forma vs longitud de la zona filtrante. Los tres factores de forma que utiliza son:

a) Recarga en forma de elipsoide (Dachler, 1936 y Hvorslev, 1951), corresponde a la nº 4 del **cuadro 1**:

$$F_a = \frac{2\pi L_i}{Ln \frac{L_i}{R_w}}$$

b) Recarga en forma de semielipsoide (Dachler, 1936 y Hvorslev, 1951), similar a la nº 6 del **cuadro 1**:

$$F_b = \frac{2\pi L_i}{Ln \left[ \frac{L_i}{R_w} + \sqrt{1 + \left( \frac{L_i}{R_w} \right)^2} \right]}$$

Respecto a esta expresión existe cierta controversia en la bibliografía consultada puesto que en algunas publicaciones incluyen  $2R_w$  en vez de  $R_w$ . En esta aplicación se ha optado por utilizar  $R_w$  porque es la que emplea Mace en su artículo original de 1999 en las gráficas para definir los sectores de fiabilidad.

c) Recarga en forma de esfera (Chapuis, 1989) corresponde a la nº 3 del **cuadro 1**:

$$F_c = 4\pi R_w \sqrt{\frac{L_i}{2R_w} + 0.25}$$

Las representaciones gráficas de estos factores en función de  $L_i$  junto con la delimitación de la fiabilidad se recogen en la **figura 2.3**. Estas figuras fueron elaboradas por Mace experimentalmente aplicando el método de Hvorslev. Para los tres factores de forma utilizados, se han delimitado los sectores en los que la permeabilidad podrá ser calculada con alta, media o baja precisión. Los sectores se han

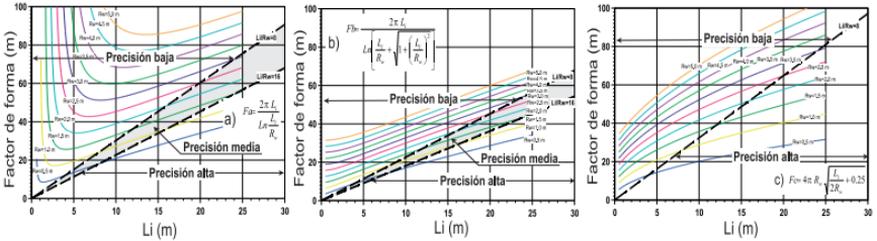


Figura 2.3. Factores de forma vs  $L_i$  y delimitación de espacios de precisión para calcular la conductividad hidráulica.

delimitado en función de la relación  $L_i/R_w$ . Por tanto, dependiendo del factor de forma elegido y de  $L_i$  se podrá conocer la precisión de la interpretación.

Las rectas que delimitan los sectores de mayor o menor precisión tienen las siguientes expresiones:

- |                     |                   |                   |
|---------------------|-------------------|-------------------|
| Factor de forma a): | para $L_i/R_w=8$  | $F_3 = 3.022 L_i$ |
|                     | para $L_i/R_w=16$ | $F_3 = 2.266 L_i$ |
| Factor de forma b): | para $L_i/R_w=8$  | $F_b = 2.263 L_i$ |
|                     | para $L_i/R_w=16$ | $F_b = 1.812 L_i$ |
| Factor de forma c): | para $L_i/R_w=8$  | $F_c = 3.238 L_i$ |

El procedimiento que sigue la aplicación para conocer en que sector se localizaría el ensayo slug según la características del pozo de gran diámetro ( $L_i$  y  $R_w$ ) sería calcular para cada uno de los tres factores de forma en que sector de los diagramas de la **figura 2.3** se localiza. De esta forma indica al usuario que grado de precisión obtendría con cada factor de forma aplicando el método de Hvorslev. El usuario elegirá aquel con el que obtiene mayor precisión. La localización del punto en el diagrama se obtiene aplicando la ecuación de la distancia de un punto a una recta que pasa por el origen:

$$d(A,D) = \frac{aX_A - Y_A}{\sqrt{a^2 + 1}}$$

donde:

$d(A,D)$ , distancia del punto A a la recta D

a, pendiente de la recta

$X_{A,r}$ , coordenada X del punto A

$Y_{A,r}$ , coordenada Y del punto A

Si  $d(A,D)$  es positiva está por debajo de la recta y si es negativa está por encima. Por ejemplo, si el pozo tiene un valor de  $L_r=10$  m y  $R_w=1.5$  m, el factor de forma a) toma un valor 33.1 m, el b) 24.2 y el c) 35.7. Con estos valores:

Factor de forma a):	para $L_r/R_w=8$	$d(A,D) = -0.9$ (negativo)
	para $L_r/R_w=16$	$d(A,D) = -4.2$ (negativo)
Factor de forma b):	para $L_r/R_w=8$	$d(A,D) = -0.6$ (negativo)
	para $L_r/R_w=16$	$d(A,D) = -2.9$ (negativo)
Factor de forma c):	para $L_r/R_w=8$	$d(A,D) = -0.9$ (negativo)

En este caso, tanto para el factor de forma a) como el b) están dentro del sector de poca precisión en la estimación, pero con el caso del factor de forma c) se localiza en el sector de alta precisión, por tanto el factor de forma a emplear sería el c) que simula una recarga esférica.

En el caso de los factores de forma a) y b) cuanto mayor es la distancia a la recta  $L_r/R_w=8$  mayor es la precisión, en el caso del factor de forma c) cuanto menor es la distancia mayor es la precisión. En este sentido, la aplicación, además de indicar la precisión de los factores, señala con cual se obtiene mayor precisión.

No obstante, hay que indicar que existen otras limitaciones que afectan a la fiabilidad de los ensayos slug en pozos de gran diámetro, algunas de las cuales se apuntan en la mencionada publicación de 1999 de Mace. Entre otras circunstancias, se pueden señalar que la conductividad hidráulica no debe ser alta o que la velocidad en que se produce el llenado o el vaciado para el ensayo slug debe ser rápida, en pozos de gran diámetro el efecto capacidad puede ralentizar mucho el vaciado.



### 3. Requerimientos e instalación

Para la instalación y utilización del programa es necesario que el sistema tenga la siguiente configuración mínima:

- 512 MB de RAM.
- Monitor con resolución de 1024 x 768 píxeles.
- Sistema Operativo Windows XP ó superior.
- 100 MB disponibles en el disco duro.
- .NET Framework 4.0 (proporcionado junto con la aplicación y disponible en la página de descargas de Microsoft).

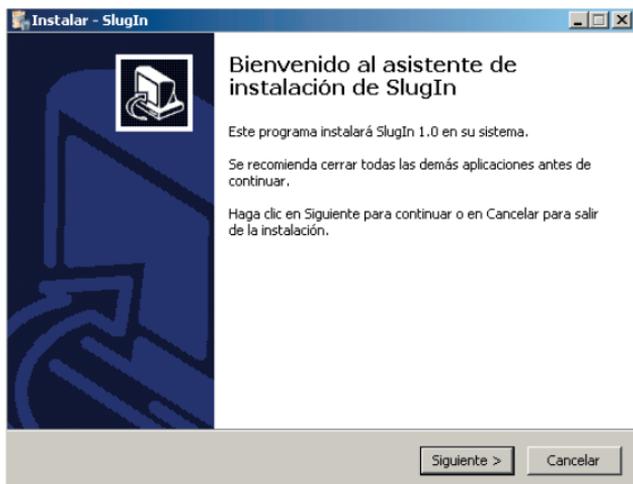
Como requerimiento adicional, para algunas funcionalidades de importación, es necesario tener instalado el programa Microsoft Excel y Microsoft Word para la presentación de informes.

La instalación, al igual que la aplicación, están preparadas en español e inglés e incluye los siguientes ficheros:

- **Setup\_SlugIn.exe**: fichero ejecutable con la instalación del **SlugIn 1.0**.
- **ReadMe.txt** y **ReadMe\_eng.txt**: ficheros de texto (en los dos idiomas) con información acerca de la instalación, requisitos del sistema y/o detalles a tener en cuenta.
- **Solo si es necesario**: carpeta con los ficheros de instalación del .NET Framework 4.0, por si no estuviera instalado en el sistema (el Setup avisa sino lo encuentra instalado).
- **Tutorial**.

La aplicación se suministra en soporte CD junto con los programas mencionados que contienen los archivos necesarios para su instalación, así como ficheros de ejemplo y la documentación correspondiente.

- Para su instalación se ejecutará desde Windows el fichero **Setup\_SlugIn.exe**,



*Figura 3.1. Ventana de instalación de la aplicación.*

que contiene el CD, y que, al iniciar pregunta el idioma en el que se continuará la instalación. Tras lo que se mostrará la ventana de la **figura 3.1**

Se debe pulsar Siguiente y aceptar o modificar las opciones que solicitan los sucesivos formularios, como la carpeta de destino en la que se instalará la aplicación en el equipo o si se crea un icono en el escritorio o en el Inicio Rápido. Acto seguido se pide confirmación para iniciar la instalación propiamente dicha. Finalmente se informa que ésta se ha completado con éxito y se pregunta si se quiere ejecutar **SlugIn 1.0**. Si la respuesta es afirmativa se inicia la aplicación con la **Página de Inicio** tal como se describe en el capítulo siguiente.

## 4. Descripción de la aplicación

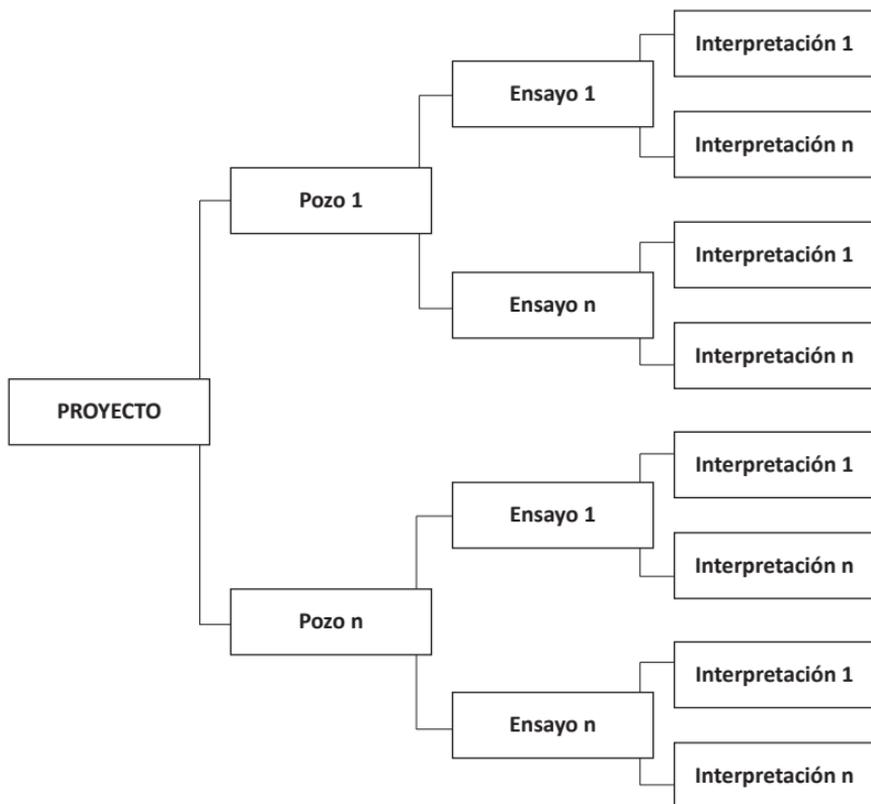
En el diseño de **SlugIn 1.0** se ha pretendido dotar a la aplicación de una utilización amigable que conduzca al usuario de forma intuitiva a través de sus menús, botones y formularios, para que así la introducción de los datos de ensayos de permeabilidad, su interpretación y visualización se haga de modo ágil y claro.

La información se organiza en proyectos que se graban como ficheros estructurados (xml), cuyo contenido, si la curiosidad lleva a ello, puede visualizarse con cualquier editor de textos. Un **Proyecto**, además de los datos descriptivos propios, está preparado para que se añadan uno o más pozos en los que se realizan uno o más ensayos, que, a su vez, pueden ser objeto de una o más interpretaciones. El esquema de la **figura 4.1** puede aclarar mejor la jerarquía descrita.

### 4.1. PÁGINA PRINCIPAL

**SlugIn 1.0** se inicia con la página principal de la aplicación y los datos de un nuevo **Proyecto** en blanco (**figura 4.2**). Este formulario inicial se estructura en una parte central en la que van apareciendo los distintos subformularios de la aplicación correspondientes a los elementos indicados en el árbol jerárquico anterior, a saber: **Proyecto**, **Pozo**, **Ensayo** e **Interpretación**, a los que hay que añadir el que corresponde a las medidas del ensayo, y cinco barras con distintas utilidades.

Las barras mencionadas se localizan en la parte superior: la **barra de título** que contiene el icono de la aplicación, el nombre del **Proyecto** actual y los habituales botones para el manejo de la ventana, por debajo de la de título está la **barra de menú** que permite acceder a todas las funciones de la aplicación y la **barra de herramientas** con algunas de las funciones que se van a utilizar con más frecuencia. En la parte inferior de la ventana o formulario principal se encuentra la **barra de estado** que muestra información relativa al **Proyecto** que se está manejando, y, por último, en el margen izquierdo, la **barra de leyenda** o navegación con la que se visualizan los distintos elementos del **Proyecto**.

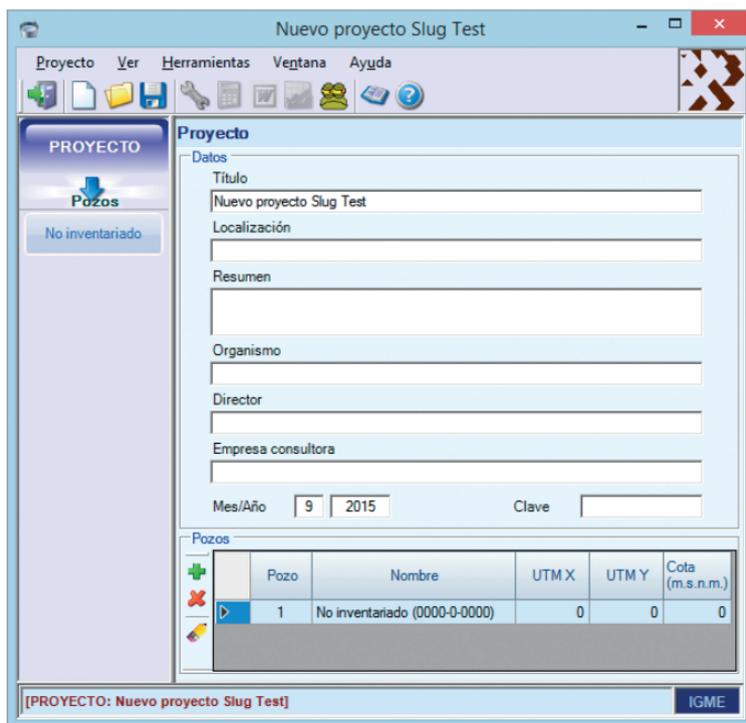


**Figura 4.1.** Esquema de la jeraquía seguida por la aplicación en la estructura de un Proyecto.

No merece la pena entrar en más detalles sobre las barras de título y estado, pero sí en las que permiten llevar a cabo las funciones de la aplicación para navegar por sus distintos elementos. Posteriormente se describirán el resto de formularios y subformularios disponibles.

### Barras de menú y de herramientas

Se hace una descripción conjunta, porque de hecho la barra de herramientas es una selección de las funciones más utilizadas de las accesibles desde la barra de menú.



**Figura 4.2.** Pantalla de inicio de *SlugIn*.

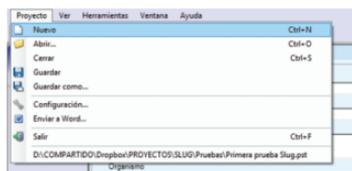
La barra de menú tiene cinco submenús:

- Proyecto, contiene funciones para manejar proyectos, para configurar la aplicación, para la generación de informes, para terminar **SlugIn 1.0** y un listado con los proyectos recientes.
- Ver, para la posibilidad de ver o no la barra de leyenda y su aspecto.
- Herramientas, permite realizar la interpretación de un ensayo y seleccionar el idioma de la aplicación (Español o Inglés).
- Ventana, para ver los otros formularios de la aplicación (mapa y gráfico)
- Ayuda, el manual de usuario y la descripción de la aplicación.

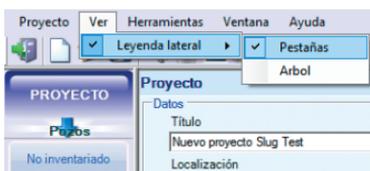
En la **figura 4.3** se muestran varios volcados de pantalla con estos submenús desplegados.



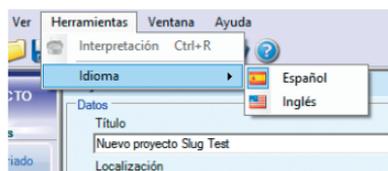
Barras de menú y herramientas



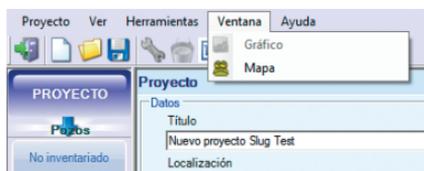
Submenú Proyecto



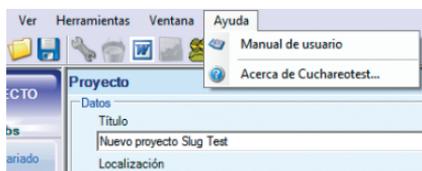
Submenú Ver



Submenú Herramientas



Submenú Ventana



Submenú Ayuda

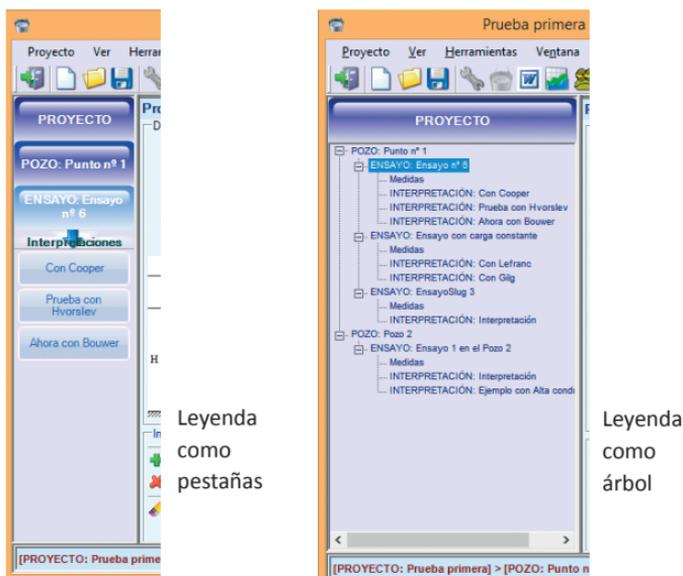
**Figura 4.3.** Ejemplo de submenús a los que se accede desde la barra de menú y herramientas.

## Barra de leyenda o navegación

Es la barra lateral situada a la derecha de la parte central. Permite navegar por los distintos elementos de la aplicación que se muestran como subformularios con datos en la parte central de **Slugin 1.0**.

Puede mostrarse en dos formatos, como pestañas (presentación por defecto), que son una serie de botones que permiten un acceso secuencial en la jerarquía de los elementos o como una vista en árbol, que permite un acceso más directo al elemento que se pretenda activar.

En la **figura 4.4** se muestran los dos formatos. El ancho de la leyenda se puede modificar desplazando su borde derecho en el que hay una barra de split. Al desplazar la barra de split se reajusta el ancho del formulario para que sus datos se sigan mostrando completos.



**Figura 4.4.** Formatos de presentación de la leyenda lateral.

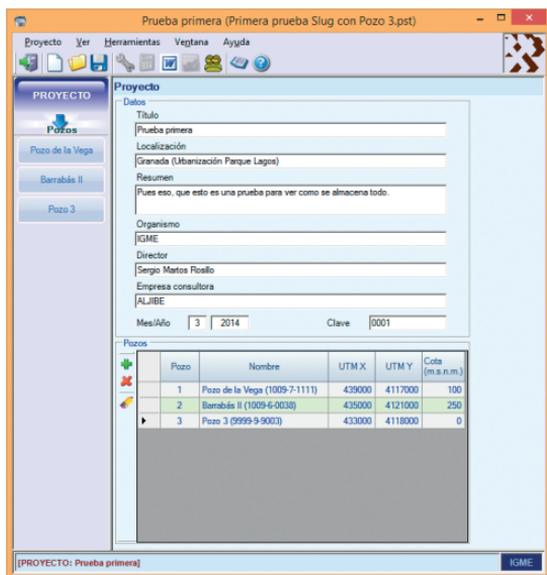
## 4.2. SUBFORMULARIOS

Son cinco los subformularios que se pueden mostrar en la parte central de **Slugin 1.0**, los correspondientes a los cuatro tipos de elementos y, además, el de las medidas del ensayo:

- Proyecto
- Pozo
- Ensayo
- Medidas del ensayo
- Interpretación

Según se van pulsando los botones de la leyenda lateral se muestra el subformulario del elemento seleccionado con sus datos.

En el caso del **Proyecto** se muestran datos descriptivos de este elemento y la lista de pozos, tabla situada en la parte inferior, que forman parte de él (**figura 4.5**). En la leyenda lateral se muestran sendos botones por cada uno de los pozos de la



**Figura 4.5.** Datos del Proyecto.

lista. Pulsando sobre uno de ellos (o haciendo doble click en la fila de la tabla) se muestra el formulario correspondiente.

Los botones situados a la izquierda de la tabla sirven para añadir un nuevo pozo, eliminar y mostrar el subformulario del pozo seleccionado.

Todos los subformularios tienen un aspecto parecido. En el caso del **Pozo** se muestran también algunos datos descriptivos del pozo y en la parte inferior un listado, en forma de tabla, en este caso con los ensayos realizados en el pozo (**figura 4.6**).

Hay que hacer notar que, tanto en esta ventana como en la del **Proyecto**, se encuentra habilitado el botón **Mapa**, resaltado en la imagen siguiente. Este botón permite visualizar la situación de los pozos del **Proyecto** en un contexto georreferenciado (**figura 4.7**).

Al hacer doble clic sobre una de las filas de la tabla o al pulsar uno de los botones de la barra lateral se muestra el subformulario del ensayo seleccionado (**figura 4.8**). Esta ventana muestra los datos de un ensayo de permeabilidad con los pa-

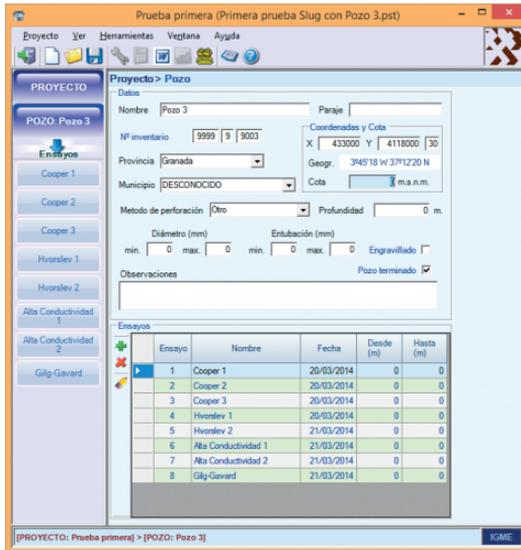


Figura 4.6. Datos del Pozo.

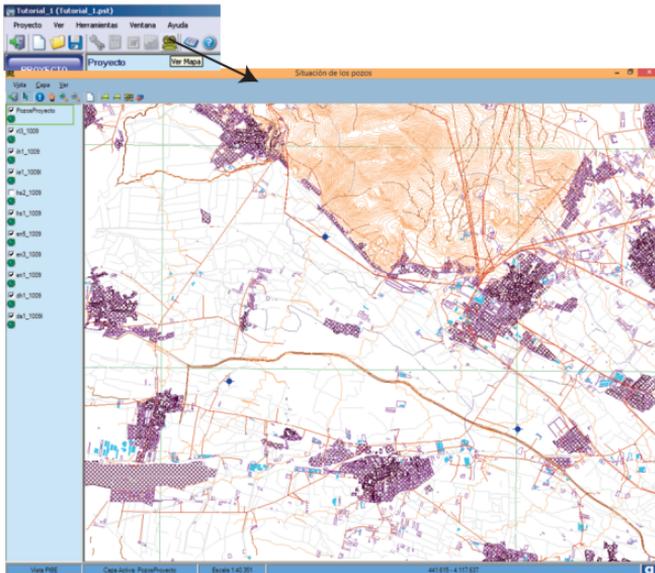


Figura 4.7. Vista georreferenciada con los pozos del Proyecto.

rámetros necesarios en los posibles métodos de interpretación. Los ensayos pueden ser de carga variable o de carga fija; para la utilización de uno u otro tipo es recomendable seguir el protocolo indicado en el apartado de metodología. Los de carga variable implican medidas temporales a lo largo del ensayo hasta conseguir la estabilización del nivel del agua en el tramo de pozo ensayado, lo que se produce en más o menos tiempo dependiendo de la permeabilidad del terreno. Por el contrario, los de carga fija se resuelven de forma independiente del tiempo teniendo en cuenta el caudal que permite la estabilización del nivel piezométrico.

En el caso de los ensayos de carga variable, las medidas se introducen en el formulario al que se accede haciendo click en la etiqueta situada en la esquina superior derecha: **Medidas del ensayo** (figura 4.9). Este subformulario tiene un menú que permite editar, cortar, copiar y pegar líneas. En **Herramientas** se pueden llevar estos datos a Excel de Microsoft para modificarlos a gusto del usuario y devolverlos a la aplicación. Las medidas se presentan en forma de estadillo con cinco columnas:

- **Si/No**, con la que se marca si ese dato es utilizado o no en los cálculos.
- **Tiempo**, el segundo en el que se ha tomado la medida desde el inicio del ensayo.

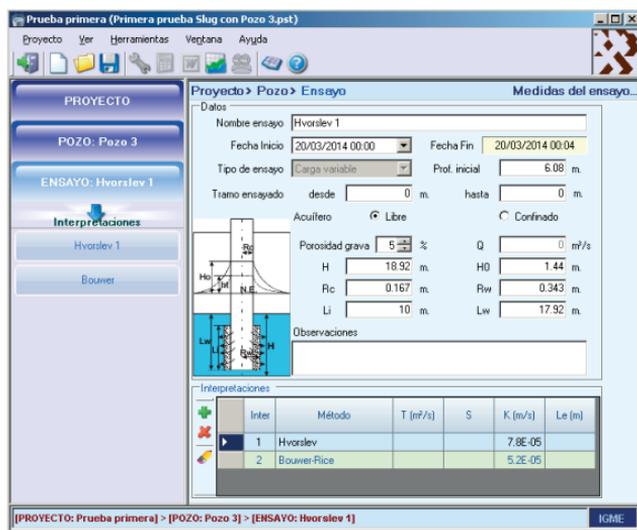


Figura 4.8. Datos del Ensayo.

Si/No	Tiempo (seg)	Prof. del agua (m)	Ascenso (m)	Observaciones
<input checked="" type="checkbox"/>	0	4.64	1.44	
<input checked="" type="checkbox"/>	2	4.825	1.255	
<input checked="" type="checkbox"/>	4	4.864	1.216	
<input checked="" type="checkbox"/>	6	4.91	1.17	
<input type="checkbox"/>	9	4.92	1.16	
<input type="checkbox"/>	10	4.92	1.16	
<input checked="" type="checkbox"/>	12	5.035	1.045	
<input checked="" type="checkbox"/>	14	5.068	1.012	
<input checked="" type="checkbox"/>	16	5.1	0.98	
<input checked="" type="checkbox"/>	18	5.131	0.949	
<input checked="" type="checkbox"/>	20	5.161	0.919	
<input checked="" type="checkbox"/>	22	5.189	0.891	
<input checked="" type="checkbox"/>	24	5.217	0.863	
<input checked="" type="checkbox"/>	26	5.242	0.838	
<input checked="" type="checkbox"/>	28	5.269	0.811	
<input checked="" type="checkbox"/>	30	5.293	0.787	
<input checked="" type="checkbox"/>	32	5.317	0.763	

**Figura 4.9.** Formulario de medidas de la evolución de la profundidad del nivel de agua en el Ensayo.

- **Profundidad del agua**, medida del nivel del agua en el pozo.
- **Ascenso**, diferencia entre la profundidad del nivel medido y el tomado antes de empezar el ensayo.
- **Observaciones**, posibles comentarios a la medida realizada.

La ventana con los datos de una interpretación (se pueden hacer varias en un mismo ensayo) es diferente según el método de interpretación seleccionado (**figura 4.10**). Unos métodos, como el de Cooper-Bredehoeft-Papadopulos, utilizan la Transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S). El botón con la imagen de un candado sirve para fijar el parámetro en el proceso de interpretación. Este proceso calcula los valores de estos parámetros que más se ajustan a los datos medidos en el ensayo. Otros métodos, como el de Hvorslev o el de Bouwer-Rice emplean la conductividad hidráulica (k).

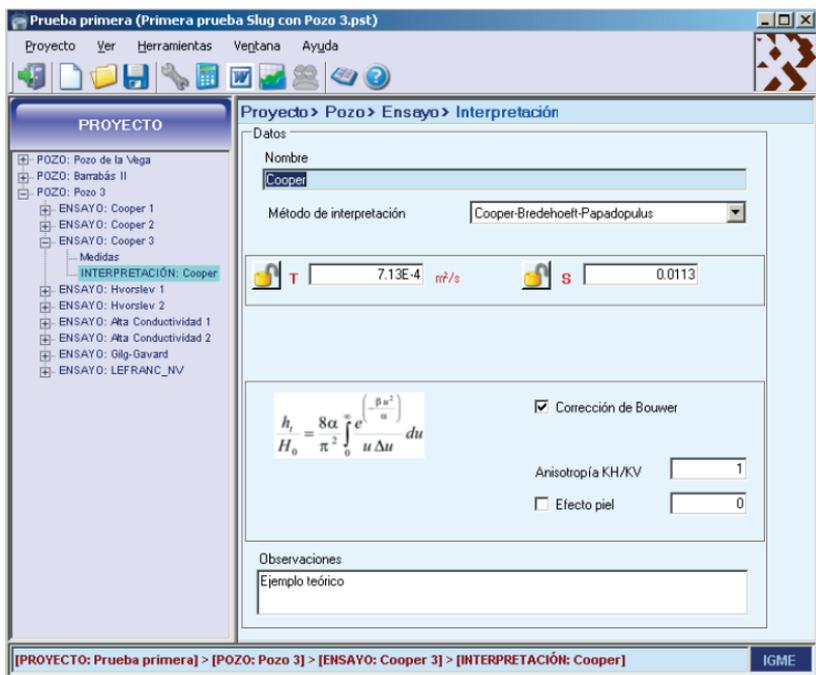


Figura 4.10. Datos de la Interpretación.

### 4.3. GRÁFICO

El botón resaltado a la izquierda es el que inicia la interpretación, que, cuando termina, muestra una nota informativa con las iteraciones realizadas en el proceso y los resultados óptimos de las variables calculadas (figura 4.11).

Además de la nota informativa se muestra el gráfico con las series temporales de los datos del ensayo y los calculados en la interpretación.

También se puede mostrar el gráfico sin realizar el proceso de interpretación, pero sí una simulación con los parámetros actuales.

El gráfico es personalizable y permite interactuar al usuario con las variables objeto de cálculo. Según se van modificando estas en la barra de la parte inferior del gráfico la curva se va recalculando y dibujando automáticamente.

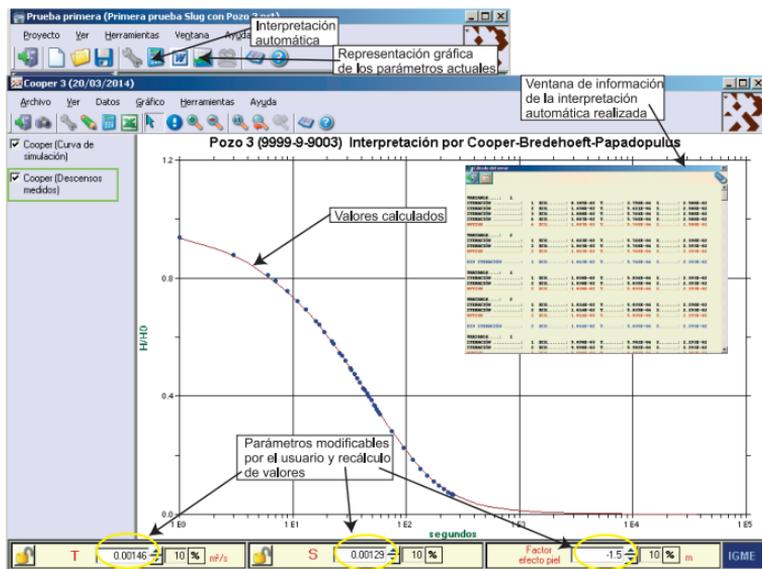
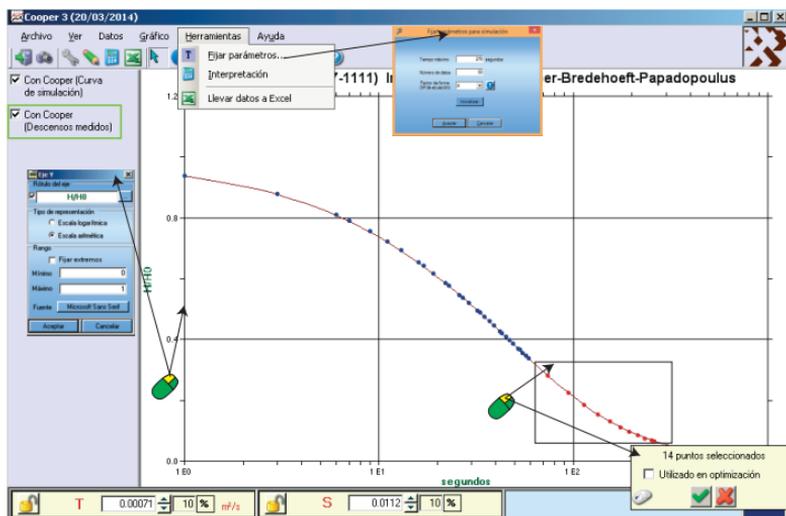


Figura 4.11. Grafico con los datos del ensayo y los calculados.

El formulario del gráfico tiene una disposición similar al principal de **SlugIn 1.0**: barra de menú, de herramientas, la lateral con la leyenda de las series dibujadas en el gráfico, la de estado con los controles para modificar las variables y la parte central con el gráfico.

El gráfico se muestra con opciones de dibujado por defecto dependiendo del tipo de ensayo, por ejemplo, el eje temporal de abscisas es logarítmico en el caso de la interpretación por Cooper-Bredehoeft-Papadopolus, en cambio es el eje de ordenadas el logarítmico en Hvorslev o en Bouwer-Rice.

De la barra de menú hay que destacar los submenús **Datos**, que muestran los datos de las curvas del ensayo o los datos medidos corregidos ( $H/H_0$ ), y **Herramientas**, donde se pueden fijar parámetros que intervienen en la simulación de la curva, iniciar la interpretación o llevar los datos de la curva a Microsoft Excel (figura 4.12). Sobre el gráfico (al igual que en el estadillo de datos con la columna **Si/No**) se pueden marcar los datos que se quiere que intervengan o no en los cálculos (en color rojo los que no), también se pueden modificar las propiedades de los ejes.



**Figura 4.12.** Grafico con los datos del ensayo y los calculados.

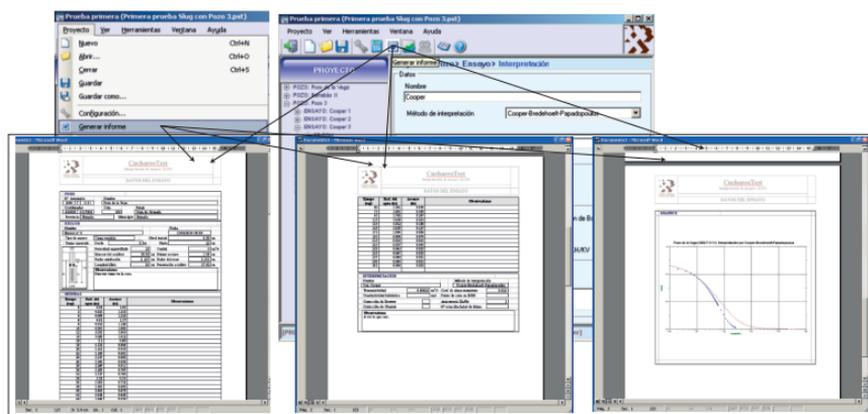
En la barra de botones, además de algunas funciones seleccionadas de las incluidas en la barra de menús, hay un grupo de botones que permiten interactuar con el propio gráfico: funciones de zoom, de selección o de consulta.

	Cerrar y volver a la aplicación principal		Zoom acercar
	Exportar el gráfico a fichero de imagen		Zoom alejar
	Cambiar los parámetros de visualización del gráfico		Vista del gráfico completo
	Redibujar el gráfico		Mostrar la Vista anterior del gráfico
	Interpretar las medidas del ensayo y actualizar el gráfico		Ir a la Vista siguiente
	Llevar los datos de la curva simulada a Excel		Ver el manual de usuario
	Seleccionar elementos del gráfico		Mostrar el formulario "Acerca de"
	Mostrar información del punto seleccionado		

**Figura 4.13.** Barra de botones de herramientas para interactuar con el gráfico.

#### 4.4. GENERACIÓN DE INFORMES

Con la información de la interpretación seleccionada y los datos de su ensayo y pozo, así como el gráfico con la curva de simulación se puede generar un informe en Microsoft Word. Para ello basta hacer click en el botón resaltado de la barra de herramientas o bien en el submenú correspondiente de la barra de menús: **Proyecto** > **Generar informe**. Con ello se crea un documento de Word como el que se muestra en la **figura 4.14**. El documento se puede guardar, editar en Word para su modificación o imprimir.



**Figura 4.14.** Informe en Word con los datos de la Interpretación.



En este epígrafe se describe paso a paso un ejemplo de utilización de la aplicación para interpretar un ensayo slug por diferentes métodos.

Una vez ejecutado el programa se abre un **Proyecto** → **Nuevo** al que hemos denominado Tutorial\_1. Los datos relativos al Proyecto se incluyen en el correspondiente formulario, tal y como se indica en la **figura 5.1**.

Este proyecto puede utilizar varios sondeos de investigación. Conforme el usuario los vaya creando se van incorporando en una relación que se recoge abajo del formulario de datos del proyecto.

En este tutorial se van a incluir los datos de un sondeo en el que se ha realizado un ensayo slug en las condiciones que se muestran en el croquis de la **figura 5.2**. Haciendo doble clic en la pestaña del menú lateral sondeo no inventariado, o en la relación que se muestra abajo del formulario del proyecto, se accede al formulario correspondiente del sondeo que hay que cumplimentar (**figura 5.3**).

Formulario de datos del proyecto:

**Datos**

Título: Tutorial\_1

Localización: La Zúbia (Iriarada)

Resumen: Estudio de la conductividad hidráulica para la construcción de un Parque Acuático

Organismo: IGME

Director: Sergio Matos

Empresa consultora: Albe Consultores

Mes/Año: 4 | 2014      Clave: A-0001-2014

Pozo	Nombre	UTM X	UTM Y	Cota [m.s.n.m.]
1	No inventariado (0000-0-0000)	0	0	0

**Figura 5.1.** Formulario para indicar los datos del proyecto de trabajo.

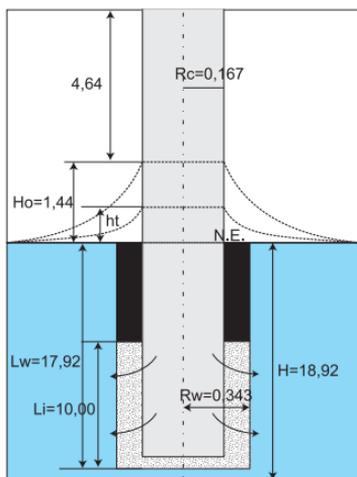


Figura 5.2. Características del ensayo slug que se recoge en el tutorial.

Mediante la opción **Ver** → **Leyenda lateral** → **Arbol**, se ha modificado la presentación de la leyenda lateral de pestañas a árbol (figura 5.4).

En la parte inferior del formulario del sondeo se recoge la relación de ensayos realizados. Haciendo doble clic en uno de ellos en esta relación o en la leyenda lateral se accede al formulario correspondiente del ensayo (figura 5.5).

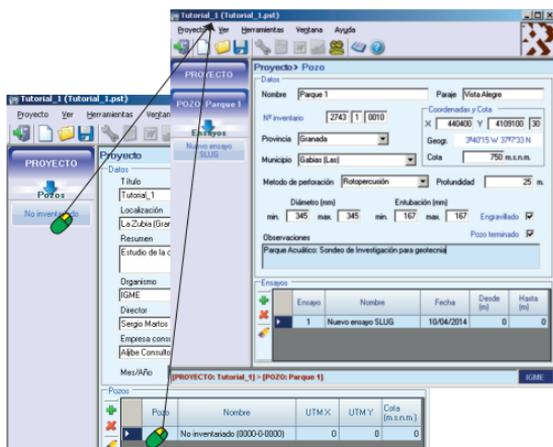
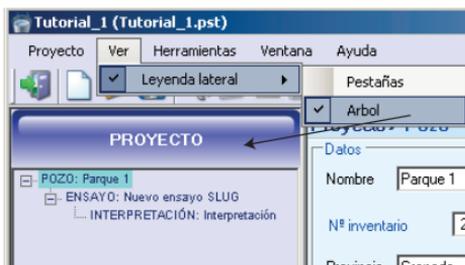
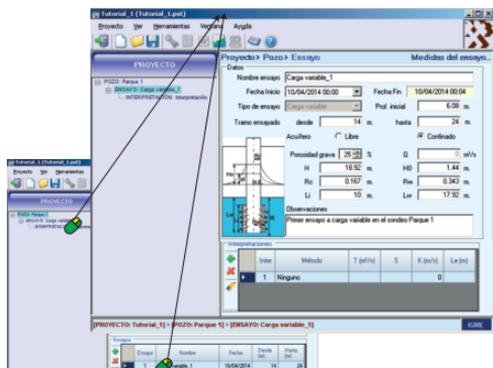


Figura 5.3. Acceso al formulario para cumplimentar los datos del sondeo ensayado.



**Figura 5.4.** Cambio de presentación a forma árbol de la leyenda lateral.



**Figura 5.5.** Acceso al formulario para cumplimentar los datos del ensayo slug.

En este formulario se cumplimentan los valores y condiciones en los que se ha realizado el ensayo slug. Este ejemplo consiste en un ensayo en que se ha subido el nivel bruscamente en el sondeo desde los 6,08 m de la profundidad inicial a 4,64 m, con un ascenso inicial de 1,44. Se van a tomar medidas en el tiempo de los ascensos residuales hasta que se alcance el nivel estático inicial, es decir, ensayo a carga variable. En este mismo formulario se indican las condiciones del ensayo que se muestran en el croquis de la **figura 5.2**.

La variación de las profundidades vs tiempo se recogen en el formulario correspondiente de medidas del ensayo, al que se accede desde el formulario del ensayo, bien desde la leyenda lateral bien desde el botón situado en la esquina superior derecha (**figura 5.6**). Las medidas del ensayo se pueden cumplimentar directamente en este formulario, o bien desde una hoja en formato Excel a la que se accede mediante la opción del formulario de medidas **Herramienta** → **Llevar datos a Excel**.

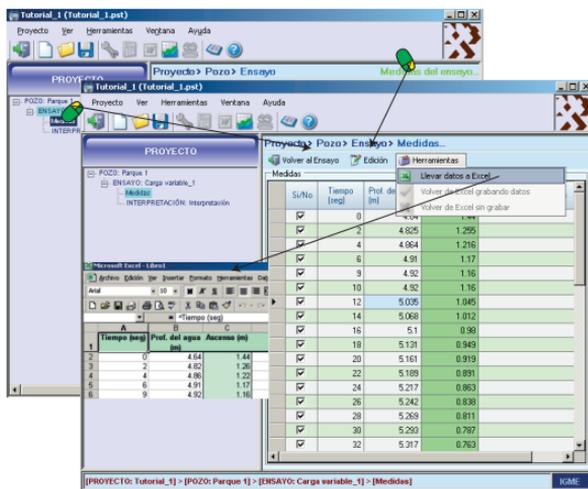


Figura 5.6. Acceso al formulario para cumplimentar las medidas de campo de profundidad vs tiempo.

De cualquier ensayo se pueden realizar varias interpretaciones por un mismo método o por diferentes. Para interpretar el ensayo hay que acceder al formulario correspondiente desde el formulario del Ensayo, bien desde la leyenda lateral o bien desde la relación de interpretaciones que se recoge en la parte inferior. En este ejemplo se va a realizar una primera interpretación por el método de Cooper-Berdehoeft-Papadopoulos (figura 5.7). Esta interpretación se realiza con unos valores iniciales de transmisividad (T) de 0.01 m<sup>2</sup>/s y coeficiente de almacena-

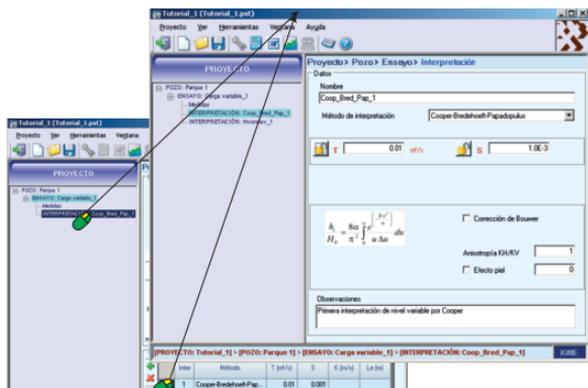


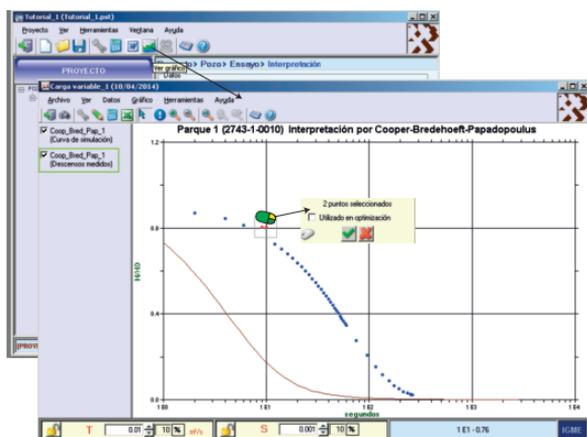
Figura 5.7. Acceso al formulario de interpretación desde el formulario de ensayo.

miento (S) de 0.001. No se realiza la corrección de Bouwer porque el nivel varía fuera de la rejilla de admisión. Tampoco se va a considerar, en principio, que exista “efecto piel” en el entorno de la perforación que distorsione la interpretación.

Esta interpretación inicial podría visualizarse junto con las medidas de campo mediante la opción **ver gráfico** de la barra de herramientas (**figura 5.8**). Como se puede observar, en este caso la primera interpretación realizada de T y S es bastante deficiente, los datos calculados son muy diferentes a los medidos. Además, hay dos puntos de medida, el cuarto y quinto, que parecen anómalos, por lo que no se van a considerar en la interpretación. Para sacarlos de la interpretación basta con seleccionarlos con el ratón y deshabilitarlos en la opción desplegable.

La interpretación automática de los parámetros hidráulicos la realiza la aplicación desde la opción **Interpretación** localizada en la barra de herramientas de la representación gráfica o del formulario de interpretación. Tras la interpretación se obtiene una ventana de información de los errores obtenidos en cada una de las iteraciones. Finalmente se traslada la interpretación a sus correspondientes casillas de la representación gráfica y del formulario de interpretación (**figura 5.9**).

Para contrastar el ajuste alcanzado se va utilizar otro método de interpretación. Para ello es necesario situarse en el formulario del ensayo abierto: Carga variable\_1. En la relación de interpretaciones que se recoge en la parte inferior se “Añade interpretación” (**figura 5.10**).



**Figura 5.8.** Acceso a la representación gráfica de los datos medidos y calculados de la interpretación y eliminación de dos puntos anómalos.

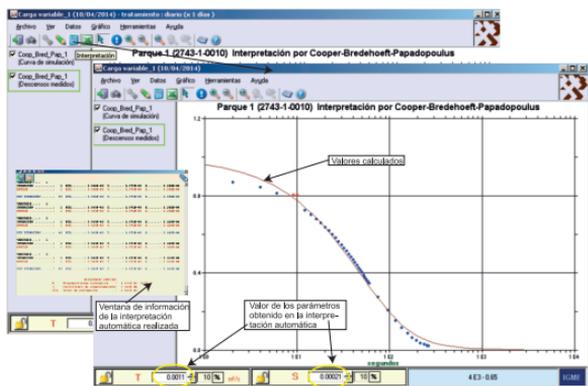


Figura 5.9. Interpretación automática del ensayo slug mediante el método de Cooper-Berdehoeft-Papadopoulos.

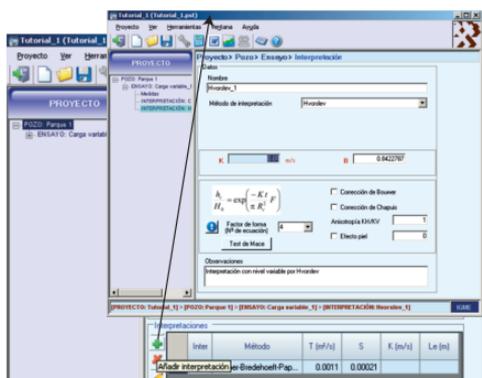


Figura 5.10. Procedimiento para añadir una nueva interpretación del ensayo realizado con nivel variable.

Se presenta un formulario igual al de la figura 5.7, el cual habrá que cumplimentar. En este caso se selecciona el método de Hvorslev. Hay que indicar una conductividad inicial y el punto de corte con el eje de ordenadas ( $k=0.01$  m/s y  $B=1$ ). Según las condiciones del ensayo, el factor de forma seleccionado por defecto es el nº 4 que corresponde al de una penetración del agua en la formación en forma de elipsoide. No obstante, el usuario puede utilizar cualquier otro factor de forma de los que se incluyen en la aplicación (figura 5.11). En esta ocasión vamos a realizar la interpretación automática directamente desde este formulario del ensayo pulsando el botón interpretación de la barra de herramientas (figura 5.12). Al igual que cuando se utilizó el método de Cooper-Berdehoeft-Papadopoulos, la aplicación muestra una ventana de información de los cálculos realizados y muestra direc-

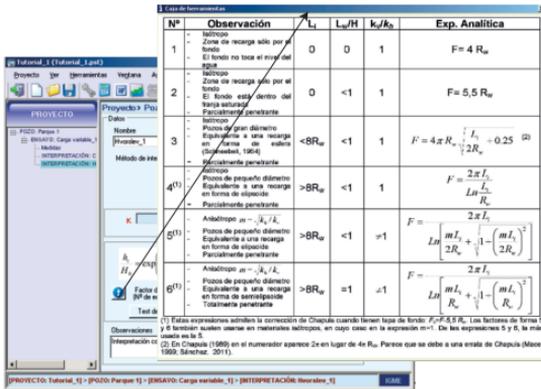


Figura 5.11. Procedimiento para cambiar el factor de forma asignado por la aplicación en el método de Hvorslev.

tamente la representación gráfica de los valores medidos y calculados. Los parámetros estimados corresponden a una conductividad hidráulica ( $k=6.73 \text{ E-5 m/s}$ ) y a un punto de corte con el eje de ordenadas ( $B=0.848$ ). De forma interactiva el usuario podrá modificar estos valores en la representación gráfica hasta escoger los que mejor considere que se ajustan al ensayo.

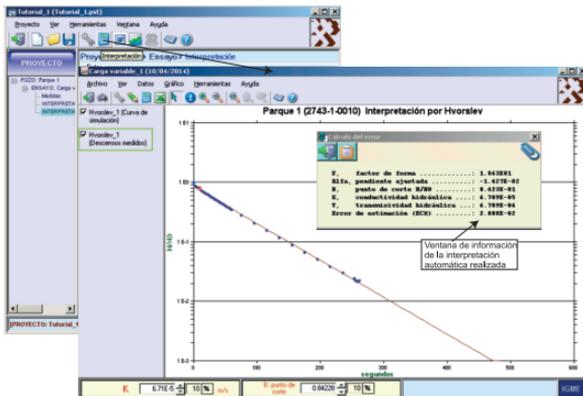


Figura 5.12. Interpretación automática realizada por el método de Hvorslev desde el formulario de Interpretación.



## 6. Referencias bibliográficas

- Bouwer, H. y Rice, R.C. 1976. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Res.* Vol. 12 (3), 423-428.
- Bouwer, H. 1989. Discussion of "The Bouwer and Rice slug test-an update". *Ground Water*, vol. 27(3), 304-309.
- Butler, J. J. Jr., Garnett, E.J. y Healey, J.M. 2003. Analysis of slug test in formations of high hydraulic conductivity. *Ground Water*. Vol. 41, 620-630.
- Butler, J.J. Jr. 1997. *The Design, Performance, and Analysis of Slug Test*. Lewis Publishers, CRC Press LLC Boca Raton, Florida, 252 pp.
- Butler, J.J. Jr., McElwee y Liu, W. 1996. Improving the quality of parameters estimates obtained from slug test. *Ground Water Vol.* 34(3), 480-490.
- Carrera, J., Samper, J., Vives, L., y Guimerá, J. 1987. Ensayos pulso: una revisión sobre su realización e interpretación. En: IV Simposio de hidrogeología. Mallorca. 1987. 463-481.
- Chapuis, R. P. 1989. Shape factors for permeability tests in boreholes and piezometers. *Ground Water*, Vol. 27(5), 647-654.
- Chirlin, G.R. 1990. The slug test: The first four decades. *Ground Water Management*. 365-381.
- Cooper, H.H., Bredehoeft, J.D. y Papadopoulos, S.S. 1967. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resources Research*. Vol. 3, 263-269.
- Dachler, R. 1936. *Grundwasserströmung*. Julius Springer, Wien, 141 pp.
- Dawson, K. y Istok, J. 1991. *Aquifer Testing: Design and Analysis of Pumping and Slug Test*, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Driscoll, F.G. 1986. *Groundwater and Wells*, 2nd ed., Johnson Division, St. Paul, MN
- Fetter, C.W. 2001. *Applied Hydrogeology*. Fourth Edition. 2001. Prentice Hall, Inc. New Jersey. 598 pp.
- Hvorslev, J.M. 1951. Time lag and soil permeability in ground water observations. *Waterways Experiment Station Corps of Engineers, U.S. ARMY*, Vol. 36, 50 p.

- Kipp, K.L. 1985. Type curve analysis of inertial effects in the response of a well to Slug Test. *Water Resource Research*. Vol 21 (9), 1397-1408.
- Kreysing, E. 1979. *Advanced engineering mathematics*. New York: John Wiley and Sons.
- Kruseman, G.P. y de Ridder, N.A. 1989. *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data* ILRI, The Netherlands. ILRI publication 47. 377 pp.
- Mace, R.C. 1999. Estimation of hydraulic conductivity in large-diameter, hand-dug wells using slug-test methods. *Journal of Hydrology*, Vol 219, 34-45.
- Ramey, H. J. Jr., Agarwal R. G. and Martin I. 1975. Analysis of slug test of DST flow period data. *Journal Can. Pet. Technol.* 14 (3), 37-47.
- Reddy, K.R., Zhou J. y Davis, J.P. 1998. In situ hydraulic conductivity of highly permeable soils using Slug Test. *Indian Geotechnical Journal*, Vol. 4, 315-338.
- Sánchez, S.R. J. 2011. *Medidas puntuales de permeabilidad ("slug test")*. <http://hidrogeología-usal.es>. Univ. Salamanca, Dpt. Geología.
- Schneebeli, G. 1954. *Mesure in situ de la perméabilité d'un terrain*. *Comptes-rendu des 3<sup>e</sup> Journées d'Hydraulique*, Alger, 270-279.
- Springer, R.K. 1991. *Application of an improved Slug Test analysis to the large-scale characterization of heterogeneity in a cape cod aquifer*. M.S. Thesis Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- Todd, D.K. y Mays, L.W. 2005. *Groundwater hydrology*. Third Edition. John Wiley and Sons, Inc. 636 pp.
- Zlonik, V.A. 1994. Interpretation of slug and packer test in anisotropic aquifers. *Ground Water* Vol 32 (5), 761-766.

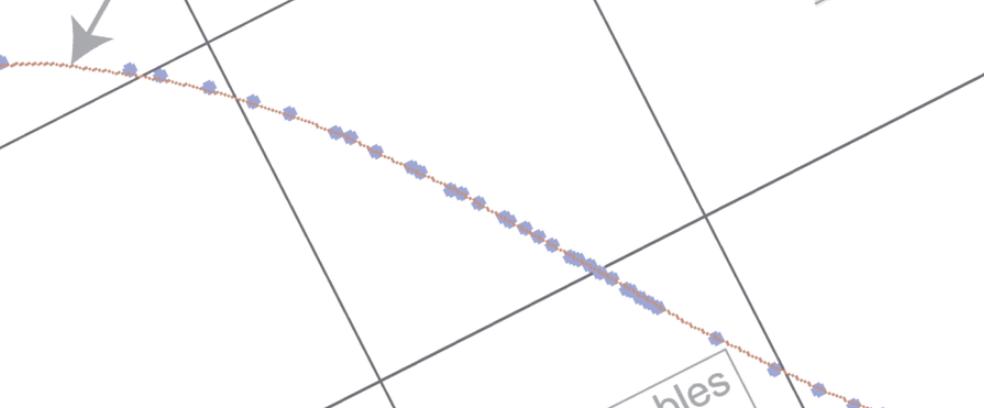


Representación gráfica  
de los parámetros actual

de automa

# 9-9003) Interpretación por Cooper-Brederhoft-Papa

Valores calculados



## Cálculo del error

Variable	Iteración	Optimo	1 ECM	2 ECM
VARIABLE	ITERACIÓN	OPTIMO	1 ECM	2 ECM
ITERACIÓN	1		8.985E-02	1.650E-02
ITERACIÓN	2		1.088E-02	1.087E-02
ITERACIÓN	3		1.088E-02	1.087E-02
ITERACIÓN	4		1.087E-02	1.087E-02
FIN ITERACIÓN	1		1.063E-02	1.063E-02
FIN ITERACIÓN	2		1.063E-02	1.063E-02
FIN ITERACIÓN	1		1.063E-02	1.063E-02
FIN ITERACIÓN	2		1.063E-02	1.063E-02
FIN ITERACIÓN	1		1.063E-02	1.063E-02
FIN ITERACIÓN	2		1.063E-02	1.063E-02
FIN ITERACIÓN	1		1.063E-02	1.063E-02
FIN ITERACIÓN	2		1.063E-02	1.063E-02
FIN ITERACIÓN	1		1.063E-02	1.063E-02
FIN ITERACIÓN	2		1.063E-02	1.063E-02