



**INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS**

**INVESTIGACIÓN DE MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE BOMBEO MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA. APLICACIÓN A FORMACIONES DE BAJA PERMEABILIDAD.**

**PARTE 2:**

**Recuperación en piezómetro después de bombeos a caudal constante.**

**Recuperación en pozo después de bombeos a caudal crítico.**

**Autores: José María López García (1)  
Ignacio Yenes Gallego (1) (2)  
Alfredo Iglesias López (3)(4)**

**2011**

- (1) Academia General Militar
- (2) Escuela Politécnica del Ejército
- (3) Instituto Geológico y Minero de España
- (4) ETS de Ingenieros de Minas

## INDICE

### INTRODUCCIÓN.

1. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.
2. MATERIALES Y METODOS.
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.
4. DISEÑO DE LA CELULA.
  - 4.1. Introducción. Célula estándar y célula específica
  - 4.2. Célula específica. Mallado, bordes y simulación
5. VALIDACIÓN DEL MODELO.
  - 5.1. Régimen transitorio.
    - 5.1.1. Theis Vs Jacob.
    - 5.1.2. Barrera Stallman (Barrera Negativa).
    - 5.1.3. Bombeo a caudal critico.
6. DISEÑO DE METODOS PARA LA INTERPRETACIÓN DE PARÁMETROS EN FORMACIONES DE BAJA PERMEABILIDAD.
  - 6.1. Recuperación en piezómetro después de bombeos a caudal constante.
  - 6.2. Recuperación en pozo después de bombeos a caudal critico.
7. AJUSTES Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.
8. CONCLUSIONES.

## BIBLIOGRAFÍA

## INTRODUCCIÓN.

El presente trabajo forma parte de un conjunto de investigaciones y desarrollos metodológicos inéditos, realizados acordes con el Convenio Marco de colaboración entre el Instituto Geológico y Minero de España y la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. El trabajo ha sido llevado a cabo por los doctorandos de la ETSIM, José María López García y José Ignacio Yenes Gallego tutelados y dirigidos por Alfredo Iglesias López, investigador titular del IGME y Jefe del Área de Sistemas de Información Geocientífica

La propuesta de investigación planteada es el estudio de métodos de interpretación de ensayos de bombeo utilizando métodos numéricos de simulación, en aquellas ocasiones de interés en las que no existen desarrollados métodos analítico-interpretativos. Estos métodos se investigan principalmente con el objetivo de incrementar la baja y poco fiable gama, hasta el momento, de métodos de interpretación aplicables a formaciones acuíferas de baja permeabilidad.

En un pasado, ya remoto, estos métodos han carecido del interés general de la investigación, dado que se buscaba el agua como fuente de suministro. Más tarde cuando el agua incidía como problema en estudios de geotecnia: túneles, ferrocarriles, presas y carreteras, el estudio de formaciones de baja permeabilidad fue adquiriendo cada vez mayor interés por parte de los investigadores.

Actualmente, el agua subterránea se ha mostrado tal y como es; el elemento fundamental de transporte de contaminantes en la geoesfera. Los estudios de emplazamientos de residuos radiactivos, residuos contaminantes urbanos y residuos tóxicos y peligrosos pasan por evaluar los parámetros hidrogeológicos de formaciones de baja permeabilidad.

Las tareas de este trabajo tutelado han mantenido dos grupos de acciones bien diferenciados:

- Acciones tendentes a adquirir por el alumno la base de conocimientos precisa para acometer la investigación concreta que se pretende.
- Acciones propias de la investigación, constituidas por las hipótesis formuladas, las simulaciones efectuadas, el análisis e interpretación de resultados y las validaciones, todo según los pasos marcados por el método de la ciencia.

Respecto al primero, el presente trabajo aporta un Anexo titulado “Base de conocimientos” en el que se sintetiza la información necesaria para acometer la investigación en curso. No tiene mayor valor ni objetivo que sintetizar y constituirse en los “apuntes de curso”.

Respecto al segundo, supone el informe de la investigación desarrollada en base a los conocimientos sintetizados y adquiridos

## 1. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

Se busca obtener un modelo numérico, o mejor aplicar un modelo numérico con la parametrización adecuada que permita hacer interpretaciones de ensayos de bombeo en determinados casos concretos y que sean de utilidad en formaciones de baja permeabilidad.

Se utilizará el modelo Modflow del United States Geological Survey (Instituto Geológico de los Estados Unidos). Es un modelo realizado por Michael G. MacDonald y Arlen W. Harbaugh. Este modelo ve la luz en 1988 y no ha parado de sufrir mejoras e investigaciones hasta la hoy día, siendo un modelo de reconocida solvencia a nivel mundial y el más conocido y usado para estudio del flujo de aguas subterráneas de la actualidad.

En los medios de baja permeabilidad, cuando se bombean los pozos es frecuente que el agua baje a la rejilla de la bomba y a partir de ahí la extracción se lleve a cabo bajo la modalidad de nivel constante en el pozo y caudal variable (caudal crítico). En este tipo de bombeo sería interesante interpretar la variación de caudales en el pozo, la recuperación en el pozo, los descensos en los piezómetros y las recuperaciones en los piezómetros.

Existen métodos analítico-interpretativos (con ciertas deficiencias y limitaciones) que permiten interpretar la evolución de caudales en el pozo y los niveles en recuperación (estimando el caudal de bombeo ponderado), también en el pozo. Sin embargo, no existen métodos analíticos para la interpretación de descenso y recuperación en el piezómetro y se tratará de encontrar procedimientos numéricos de simulación para la interpretación. Hay que tener en cuenta, en este caso, que es imprescindible el análisis de los datos del piezómetro para poder estimar el coeficiente de almacenamiento y en consecuencia de la porosidad eficaz.

También es muy frecuente en los medios de baja permeabilidad que los sondeos que se realicen para estudio de piezómetros sean de reducido diámetro, dado que no requerirán alojar instalaciones de impulsión. En estos casos suele bombearse con aire comprimido y analizar la recuperación. Tampoco existe un método analítico que permita el análisis de la recuperación en el piezómetro y se intentará acudir a una metodología numérica.

La investigación tiene en consecuencia tres fases, bien diferenciadas, para cada caso

- Diseño de una célula en el modelo (Mod Flow) que permita reproducir (simular) un pozo de bombeo real con aproximación suficiente.
- Validar la célula propuesta comparando los cálculos del modelo con los resultados de modelos analíticos conocidos para configuración propuesta.
- Simular cada uno de los casos no conocidos y sacar conclusiones de lo obtenido en la simulación (sobre modelo calibrado), para diseñar y recomendar un método de interpretación que permita estimar los valores de permeabilidad y porosidad de las formaciones.

El planteamiento será acorde con los principios del método de la ciencia: Se formulan hipótesis, se validan y se aceptan o rechazan. Si hay rechazo de hipótesis se formula una nueva y así hasta que se logra validación plena de una hipótesis formulada. Se extraen las consecuencias y se formulan las conclusiones.

## 2. MATERIALES Y METODOS.

Los materiales básicos utilizados en esta investigación, son de dos tipos: equipos físicos (hardware) y sistemas lógicos (software).

Como hardware se han utilizado simultáneamente en la investigación tres equipos portátiles con procesadores Intel Pentium de 1.6 a 2 Gz de frecuencia, 1 Gb de memoria RAM y de 60 a 100 Gb de memoria secundaria en HHDD. Todos los ordenadores disponían de conexión de banda ancha a Internet, lo que hizo posible las búsquedas para la elección y descarga del modelo y las búsquedas bibliográficas de diverso tipo muy principalmente aquellas búsquedas tendientes a descubrir la existencia de investigaciones similares en la red.

El software empleado consta de la plataforma de los ordenadores Windows XP series superiores al 2003 actualizados con Service Pack 2 de Microsoft y otros complementos significativos disponibles en "Update" de la firma.

Ha sido utilizada la versión 2003 del paquete ofimático Microsoft Office. De estas aplicaciones usadas con carácter general han sido además de Word, para la composición de los textos, Excel, donde se elaboraron todas las comparaciones gráficas y Power Point para la elaboración de las láminas de la presentación. Ha sido también utilizado Surfer v. 8.02 de Golden Software y diversos capturadores de pantalla, entre ellos Screen Hunter 5.0 Free.

El elemento software por excelencia utilizado en esta investigación es como ya se ha dicho el modelo Modflow del United States Geological Survey Michael G. MacDonald y Arlen W. Harbaugh. Este modelo, que es el original del United States Geological Survey, es de difícil uso dado que es una versión Fortran 77 y los ficheros de datos junto con el rigor de sus formatos de introducción de parámetros, hacen muy poco viable simular con mallados de cierto tamaño. Para evitar esto hay varias casas comerciales (principalmente dos) que han elaborado software de preproceso y postproceso. Son Processing Modflow (PMWIN) y Visual Modflow (VMOD). Se ha utilizado PMWIN 5.3 Free de Wen-Hsing Chiang y Wolfgang Kinzelbach. Esta versión es libre y gratuita y puede ser descargada de la red en [www.pmwin.net](http://www.pmwin.net), que se ha constituido en el sistema lógico fundamental de esta investigación.

PMWIN, en rigor, lo único que hace es permitir configurar el sistema en pantalla de un modo sencillo, elaborar los ficheros de entrada y lanzar la ejecución de Modflow. Después recogen los resultados de los ficheros de salida y permiten aplicaciones para la representación de resultados y para la calibración.

Los métodos fundamentales utilizados son:

- Discretización de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de segundo orden parabólicas, por el método de las diferencias finitas.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{R(x, y, t)}{T} \quad (\text{Ecuación general del flujo 3D})$$

- Métodos de resolución de sistemas “Gradiente conjugado” y “Procedimiento fuertemente implícito, que son, entre otros, los dos métodos de resolución asociados a Modflow y preferentemente utilizados en esta investigación..

### 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

Metodológicamente el trabajo ha consistido de cinco pasos o grupos de acciones bien diferenciados:

1. Búsqueda en Internet de trabajos similares o del mismo contenido a efectos de comprobar que la presente investigación podía tener aspectos innovadores no investigados.
2. Diseño de la célula haciendo uso del modelo Modflow.
3. Validación de los valores obtenidos por el modelo con métodos analíticos de solución conocida.
4. Simulación de los casos no conocidos por métodos analíticos y análisis de los resultados de la simulación.
5. Conclusiones y definición metodológica

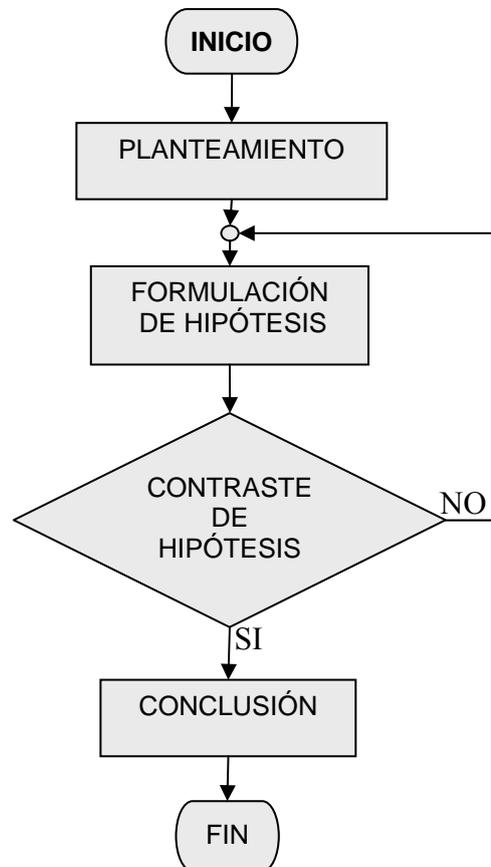
En este trabajo, se utiliza a nivel de base el “método de la ciencia” ampliamente conocido y contrastado tal y como se ha indicado en el apartado anterior.

Se aplica al diseño del modelo de simulación a implementar y consiste en cuatro pasos clásicos:

- Planteamiento del problema. Se sintetiza el problema que se quiere resolver y se define el marco conceptual.
- Formulación de hipótesis. Se formulan las hipótesis que pueden dar solución al problema.
- Contraste de hipótesis. Se contrastan las hipótesis formuladas, si se rechazan se vuelve al paso anterior y se corrigen las hipótesis formuladas o se formulan nuevas hipótesis. Cuando las hipótesis de partida son contrastadas se pasa al punto de conclusiones.

- Conclusión. Se sintetizan las proposiciones validadas y se formaliza el método.

El método sigue el proceso de la figura.



Inicialmente se han formulado hipótesis sobre la configuración más adecuada de la célula en diseño (m allado), las características temporales de la simulación, periodos de stress y pasos de tiempo y los parámetros de la simulación.

Estas hipótesis se han ido comprobando y aceptando o rechazando hasta encontrar una célula validada. Cada vez que una hipótesis de configuración, tiempo o parámetros específicos se rechazaba definitivamente, se efectuaban las oportunas rectificaciones y adiciones quedando formulada una nueva hipótesis que volvía a someterse al proceso de validación.

Ante una hipótesis validada completa y correctamente se obtenían conclusiones y se pasaba al proceso de simulación de “ métodos no conocidos”. Sobre los resultados de estos se plantean y sintetizan las metodologías que intentan diseñarse.

## 4. DISEÑO DE LA CELULA.

### 4.1. Introducción. Célula estándar y célula específica

El diseño de la célula de simulación se revela como un paso fundamental para la constatación de la validación del modelo, desde esta premisa, se requiere por lo tanto, una elevada precisión ya que de estos factores dependerá la exactitud, de los resultados posteriores. Para no caer en imprecisiones definiremos dos diseños de célula, uno que llamaremos Estándar, y otro que denominaremos Específica.

Para ambos diseños, es preciso detallar, dimensiones físicas, tamaños de las celdas de estudio, también es necesario definir las condiciones de contorno y fronteras, las referencias de temporales sobre las que van a transcurrir, así como la posición y número del pozo y de los piezómetros y posteriormente definir los parámetros hidrogeológicos que podrían ser asumidos dentro de un acuífero semiconfinado.

### 4.2. Célula específica. Mallado, bordes y simulación

La célula específica, la utilizamos básicamente para simulación de caudal crítico, para ello, se utilizó en la célula estándar para efectuar las validaciones, trasladar el método de validación a la célula específica, y una vez validada conforme a las técnicas aprendidas en la célula estándar, poder simular en esta célula, caudales, transmisividades, y coeficientes de almacenamiento con la seguridad de obtener datos veraces. Esta célula es más amplia y cuenta con unas dimensiones mayores, es más pesada en la simulación y más difícil para su ajuste y calibración por eso se hizo necesaria una primera célula para descubrir los métodos necesarios para la validación. Además esta célula cuenta con unas dimensiones de pozo real, de forma que se pueda estudiar el efecto del pozo.

Nivel piezométrico inicial.

Se decide que este tenga un valor de 150 metros, que junto a una cota superior de la capa de 100 metros configura el acuífero como acuífero cautivo o confinado.

Tamaño de la célula.

Se asigna un tamaño de 3192.25 Ha en una distribución de 5650 metros de largo por 5650 metros de ancho. Se le asigna un espesor de 160 metros. Este espesor se ha distribuido en tres capas, la primera capa de 60 metros de espesor, que configuramos como no activa, una segunda capa, de 100 metros de espesor, esta sí activa, y una última capa de 1 metro de espesor no activa, de esta forma se fuerza a que el acuífero sea confinado. Esta capa se configura sin ninguna irregularidad quedando definida para el método de cálculo como isótropa.



Intervalos temporales.

Se toman dos periodos de 1 día de duración, el primer periodo dedicado al bombeo y el segundo dedicado a la recuperación. En cada intervalo de tiempo se toman 20 veces mediciones, siguiendo estas un patrón geométrico de razón 1.3.

Piezómetros.

Se ha optado por ubicar un único piezómetro a 60.25 metros del pozo.

Parámetros hidrogeológicos y valor de bombeo.

Se ha optado por elegir los siguientes valores de Transmisividad, y coeficiente de almacenamiento, que en diferentes simulaciones queda.

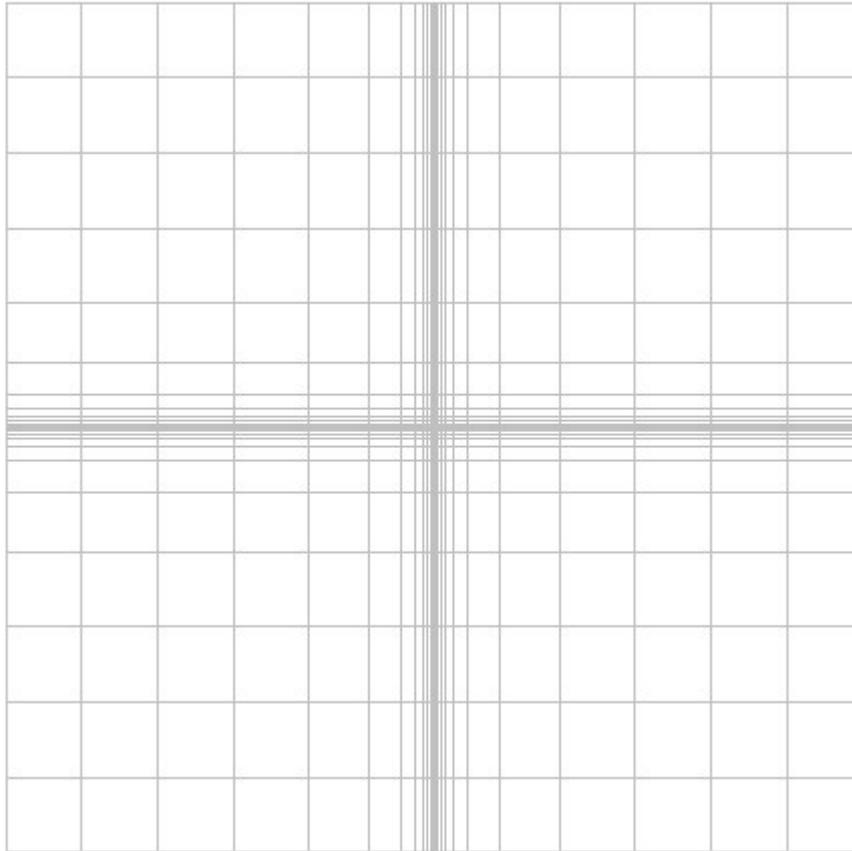
Nombre simulación	Valor de T (m <sup>2</sup> /día)	Valor de S
Simulación 1	0.5	0.0001
simulación 2	1	0.0001
Simulación 3	2	0.0001
Simulación 4	4	0.0001
Simulación 5	100	0.0001
Simulación 6	200	0.0001
Simulación 7	400	0.0001
Simulación 8	0.5	0.0005
Simulación 9	1	0.0005
Simulación 10	2	0.0005
Simulación 11	4	0.0005
Simulación 12	100	0.0005
Simulación 13	200	0.0005
Simulación 14	400	0.0005
Simulación 15	0.5	0.001
Simulación 16	1	0.001
Simulación 17	2	0.001
Simulación 18	4	0.001
Simulación 19	100	0.001
simulación 20	200	0.001
Simulación 21	400	0.001

Tabla 1. Valores de T y S en la Simulación.

Caudal de bombeo (Q) = 400 m<sup>3</sup> / día.

De esta forma se puede ajustar la grafica del caudal bombeado a una T y S, simulada.

Con todo esto la forma de la célula queda:



*Figura 1. Mallado de la célula específica.*

## 5. VALIDACIÓN DEL MODELO.

### 5.1 Régimen transitorio.

#### 5.1.1 Theis Vs Jacob.

Se procedió a la validación de las células para los casos más usuales en los ensayos de bombeo en acuíferos cautivos. En estos casos, al no ser régimen permanente el término  $\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$  no se anula y la resolución analítica es más compleja para obtener la “serie de datos reales”. El método de Theis permite la solución analítica en casos de acuíferos confinados donde se cumplan unas condiciones limitativas (No existencias de recargas anteriores, acuífero homogéneo e isótropo en cuanto K, acuífero infinito,...) ajustándose más a la realidad este método cuanto más se acerque a la realidad física de las condiciones del ensayo. La solución analítica aportada por Theis para los descensos es:

$$d = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

donde la integral es la *función de pozo*  $W(u)$ . Dicha función no tiene solución analítica, pero tiene un desarrollo en serie dado por:

$$W(u) = -0,577216 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots$$

Según Jacob, para valores de  $u < 0,03$  se podían despreciar los términos del desarrollo frente a los dos primeros  $W(u) = -0,577216 - \ln u$ , por lo que para estos casos investigados se usa la simplificación de Jacob para valores de  $u < 0,03$  y a efectos prácticos valores de  $u < 0,1$  que es una aproximación válida en la casi totalidad de los casos, quedando la fórmula de Theis:

$d = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$  una vez desarrollado se obtiene la expresión de Jacob que se empleará en la investigación para obtener la “serie real de datos” que no es otra que la serie analítica de Jacob.

$$d = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25Tt}{r^2 S}$$

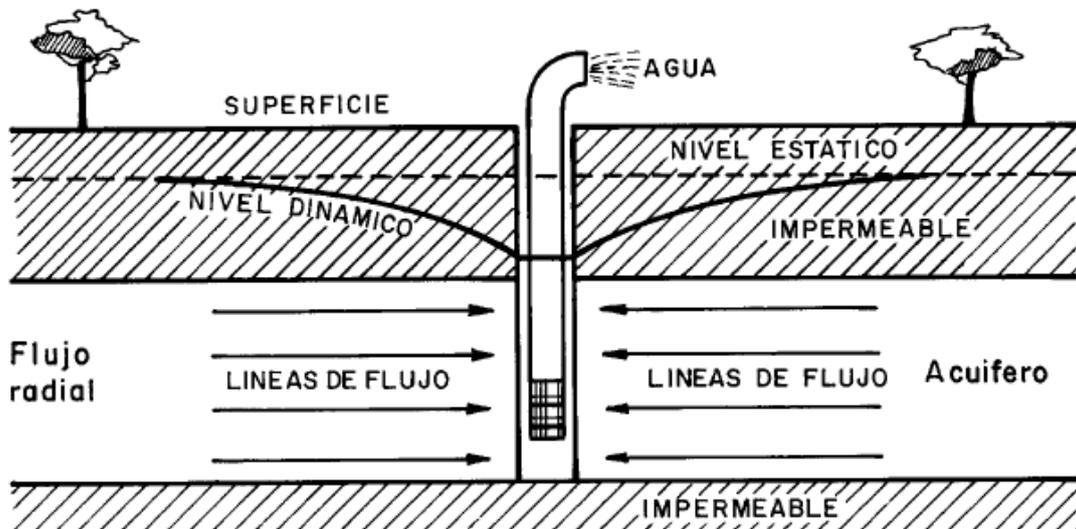


Figura 2. Esquema de flujo en acuífero cautivo.  
(Pozos y acuíferos 1984, M. Villanueva y A. Iglesias pg.42)

### Modificaciones de la célula base para la configuración del sistema.

Se ha simulado el modelo, dotando de características de régimen transitorio a todas las celdas del mallado, para ello la investigación se ha optado por dotar al modelo de dos periodos de estrés de un día cada uno, y en cada periodo se realizaron veinte extracciones de datos. Esta distribución de parámetros temporales es común para todos los casos de validación expuestos en esta investigación (Régimen Transitorio).

El primero de los periodos de estrés corresponde a la fase de bombeo anotando 400 m<sup>3</sup>/día de extracción en el pozo durante un día y posteriormente extracción cero (parada) durante el segundo

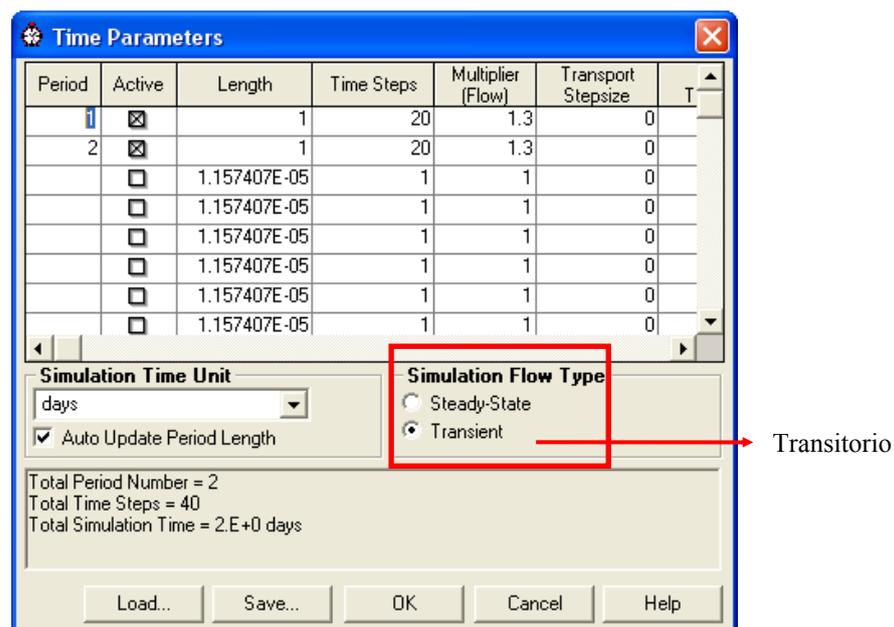


Figura 3. Parámetros temporales

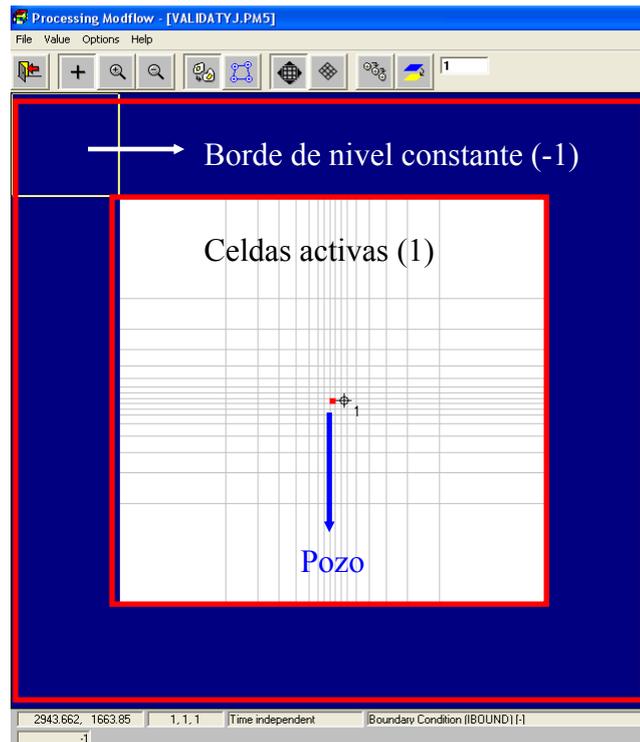


Figura 4. Descripción de las celdas del modelo para régimen transitorio

**Validación.**

Se ejecutó el modelo una vez introducidos los datos propios del régimen transitorio. Los datos obtenidos del modelo se volcaron en la base de datos (hoja de Excel) donde fueron cotejados con la “serie de datos reales” la cual no es otra que la serie analítica de Jacob. Para el segundo periodo de estrés, se simuló la recuperación en la hoja de cálculo por el método clásico de suponer una inyección de un caudal igual al bombeado a partir del momento de la parada.

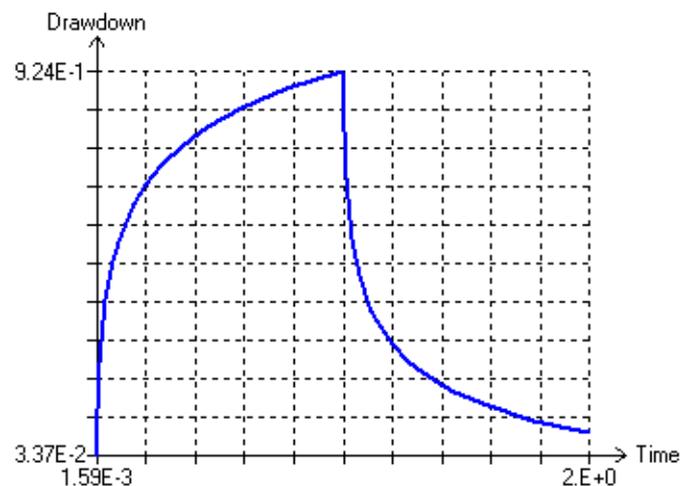


Figura 5. Gráfico. Descensos Modflow.

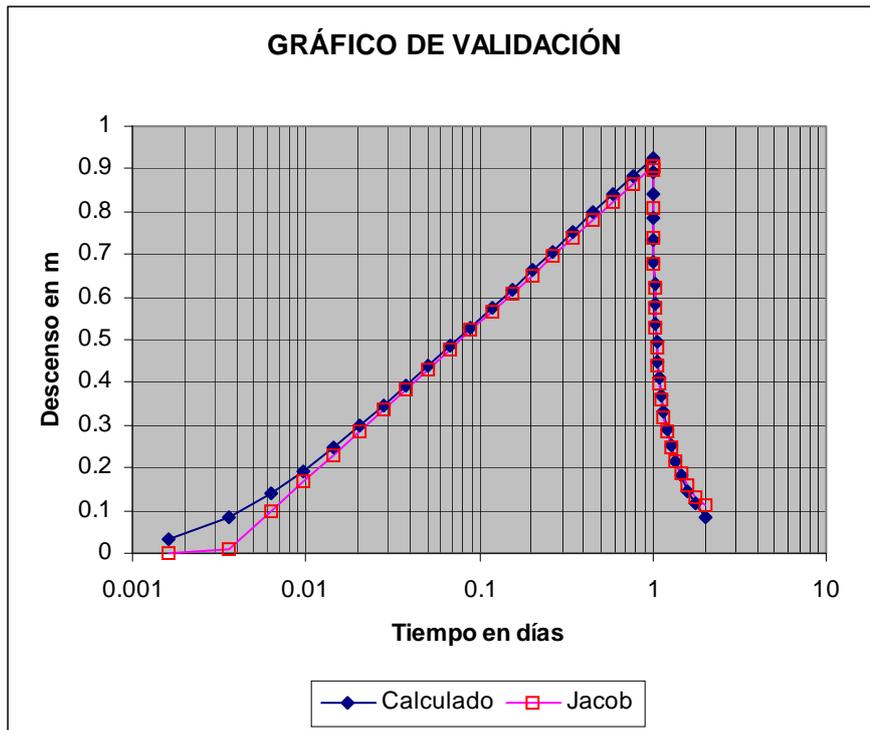


Figura 6. Gráfico. Validación en escala semilogarítmica

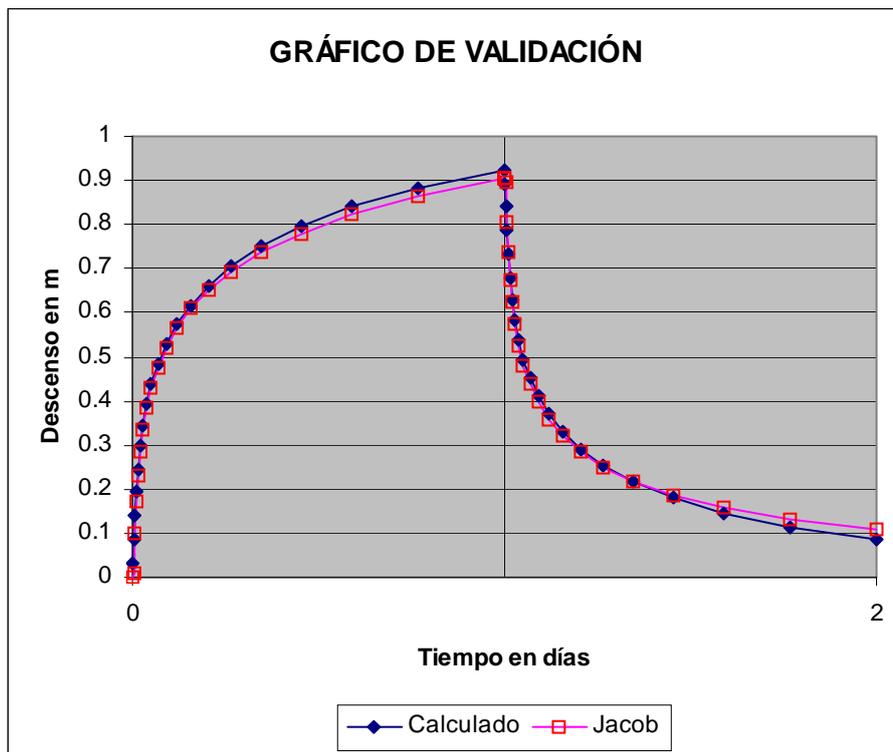


Figura 7. Gráfico. Validación en escala métrica.

Se observa las discrepancias propias de los periodos de no validez de Jacob al inicio del ensayo, valores temporales que no superen el periodo de no validez de Jacob (casos en

que  $u > 0,1$ ). Una vez superado este periodo de no validez, los valores obtenidos por el modelo se ajustan a los valores de la “serie de datos reales” que no es otra que la de Jacob.

En el resto de los tramos, tanto de bombeo como de recuperación los ajustes son óptimos salvo algunas muy pequeñas discrepancias, que se entiende son debidas a la simulación de áreas (celdas) crecientes cada vez mayores

**Por lo que el modelo para el caso de “Theis y Jacob” queda validado.**

### 5.1.2 Barrera Stallman (Barrera Negativa).

Se procedió a la validación de las células para el caso de que exista una barrera impermeable rectilínea. Dicha validación se efectuó comparando resultados del modelo propuesto con el método de Jacob y el método de las imágenes.

El método de Jacob ha sido explicado con anterioridad y el método de las imágenes para barrera negativa mantiene, y así se demuestra, que si se tiene un pozo bombeando a una determinada distancia de un borde impermeable rectilíneo e infinito, los descensos que se produzcan en el acuífero serán suma de los debidos al pozo de bombeo real más los debidos a otro pozo imaginario (pozo imagen), situado simétricamente del pozo de bombeo, respecto a la barrera rectilínea impermeable y que hubiera comenzado a bombear al mismo tiempo.

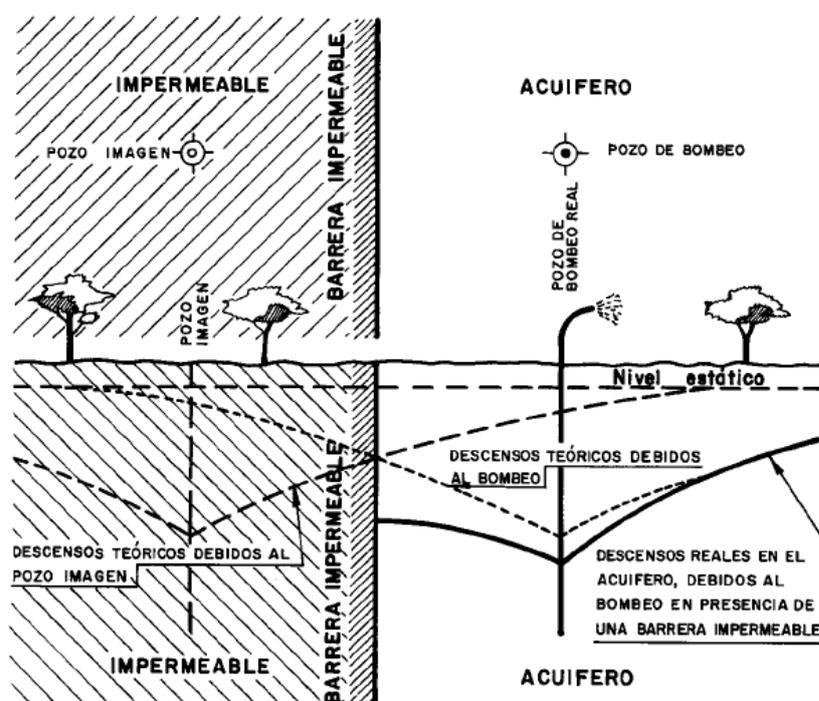


Figura 8. Esquema de los efectos de un bombeo en presencia de una Barrera impermeable (pozo imagen).

(Pozos y acuíferos 1984, M. Villanueva y A. Iglesias pg.138)

### Modificaciones de la célula base para la configuración del sistema.

Se ha simulado el borde impermeable, dotando de características de celda no activa ("0") a las tres columnas situadas a la derecha del borde de nivel constante y de la zona oeste de modelo.

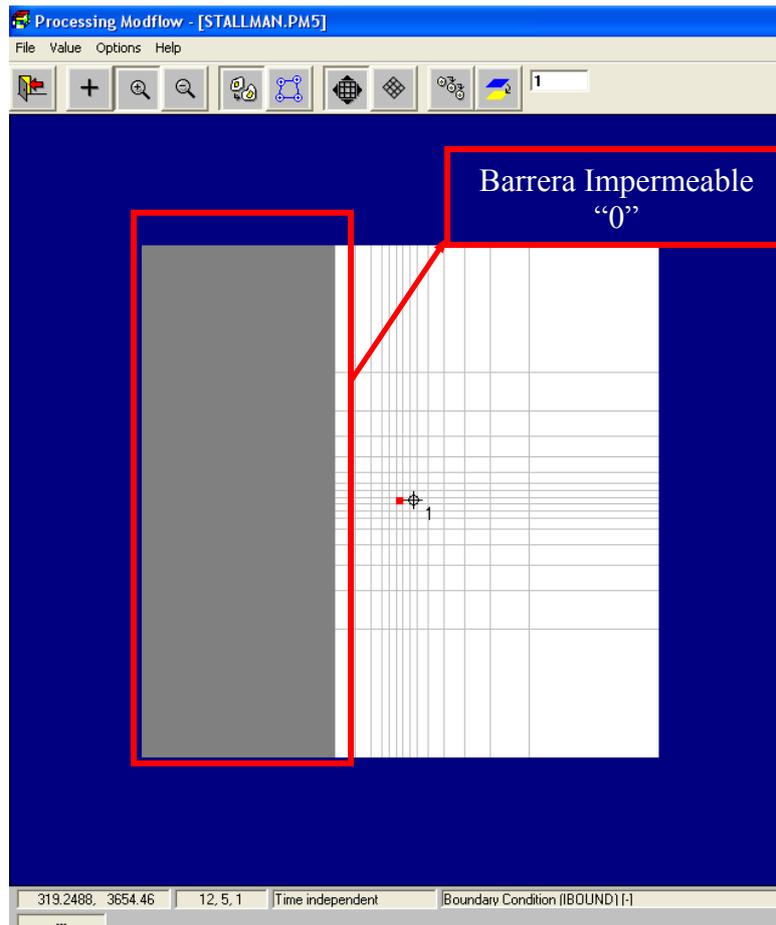


Figura 9. Descripción de las celdas del modelo para régimen transitorio en presencia de una barrera negativa.

### Validación.

Se ejecutó el modelo una vez introducido los datos propios de la barrera negativa y los datos obtenidos del modelo se volcaron en una base de datos ( hoja de Excel) donde han sido cotejados con la “serie de datos reales” la cual no es otra que la serie analítica de Jacob a la cual la hemos sumado el efecto del pozo imagen.

$$D = d + d' = 2 \times 0,183 \frac{Q}{T} \lg t - 0,183 \frac{Q}{T} \lg t_0 t'_0$$

$$D = 0,366 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25Tt}{r^2 rS}$$

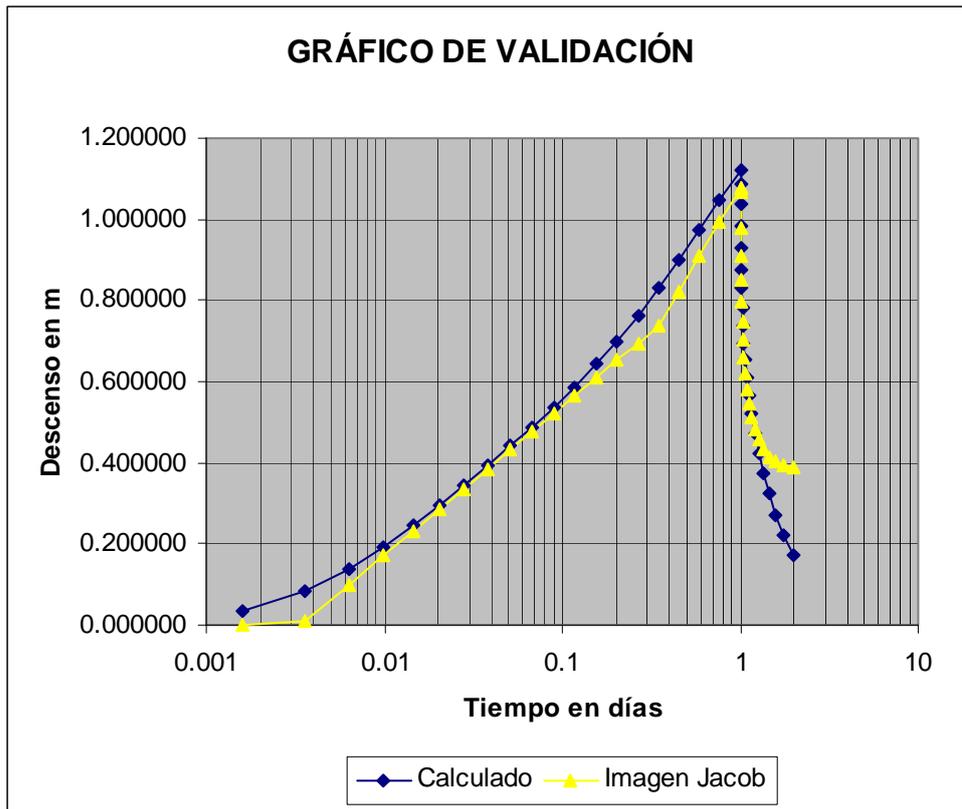


Figura 10. Gráfico. En escala semilogarítmica

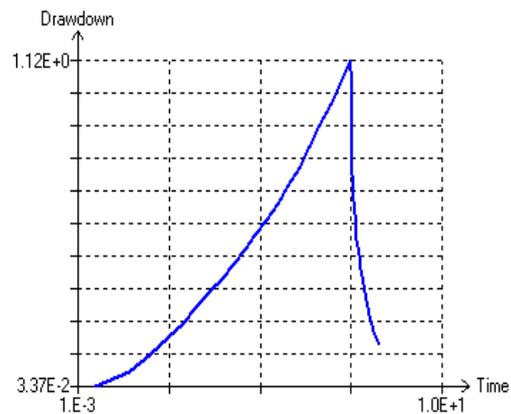
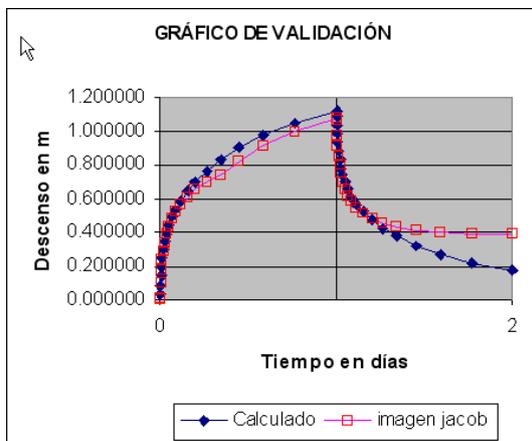


Figura 11. Gráfico. En escala decimal y gráfico de descensos de Modflow

En las curvas de los gráficos se observa que los primeros resultados no se ajustan ello es debido a que nos encontramos en el periodo de no validez de Jacob, el segundo punto donde encontramos variación es debido a que se ha llegado a la barrera impermeable, análogamente a lo anterior una vez pasado el periodo de no validez de Jacob los valores de la “serie de datos reales” se ajustan a los calculados por el modelo.

**Por lo que el modelo para el caso de Stallman “Barrera Impermeable o negativa” queda validado.**

### 5.1.3 Bombeo a caudal crítico.

Se procedió a la validación de las células para el caso de que exista un bombeo a caudal crítico. Dicha validación se efectuó con parando resultados del inverso de los caudales del modelo propuesto enfrentados al inverso de los caudales obtenidos de la “serie de datos reales” que se obtienen de Jacob.

Estos casos suceden cuando la bomba da caudales superiores a los que suministra la captación. Por lo que el nivel de captación desciende hasta el nivel de la bomba, permaneciendo constante en ese punto. Al alcanzado este punto es el caudal el que empieza a disminuir por lo que será el objeto de nuestra investigación a diferencia de los casos estudiados anteriormente.

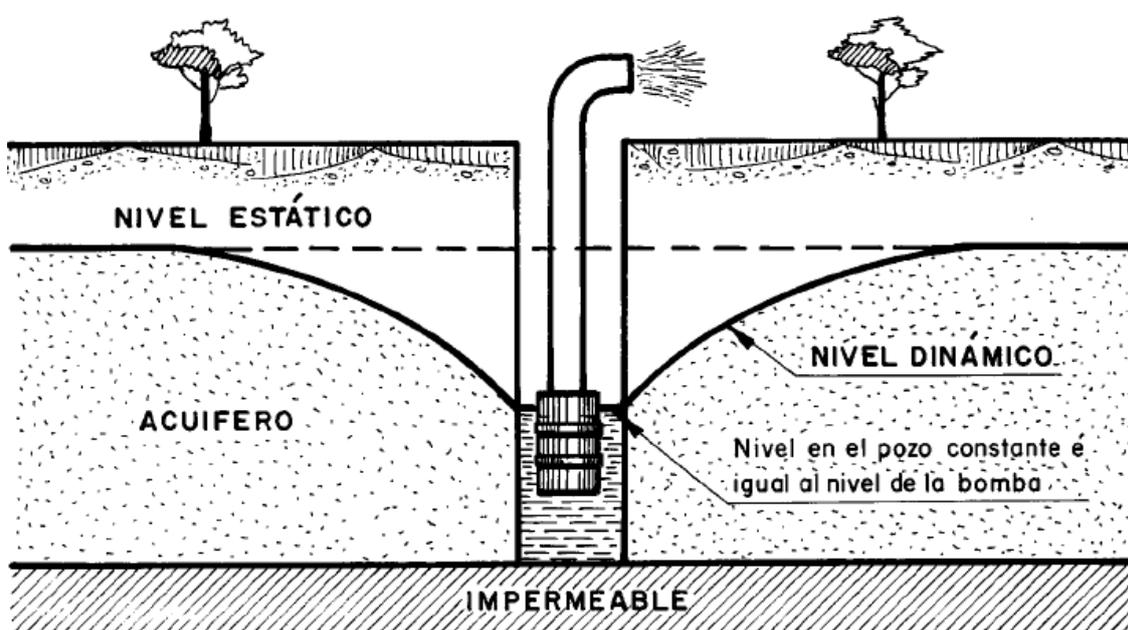


Figura 12. Esquema de los efectos de un bombeo a caudal crítico.  
(Pozos y acuíferos 1984, M. Villanueva y A. Iglesias pg.159)

El descenso viene dado por:

$$d = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25Tt}{r^2 S}$$

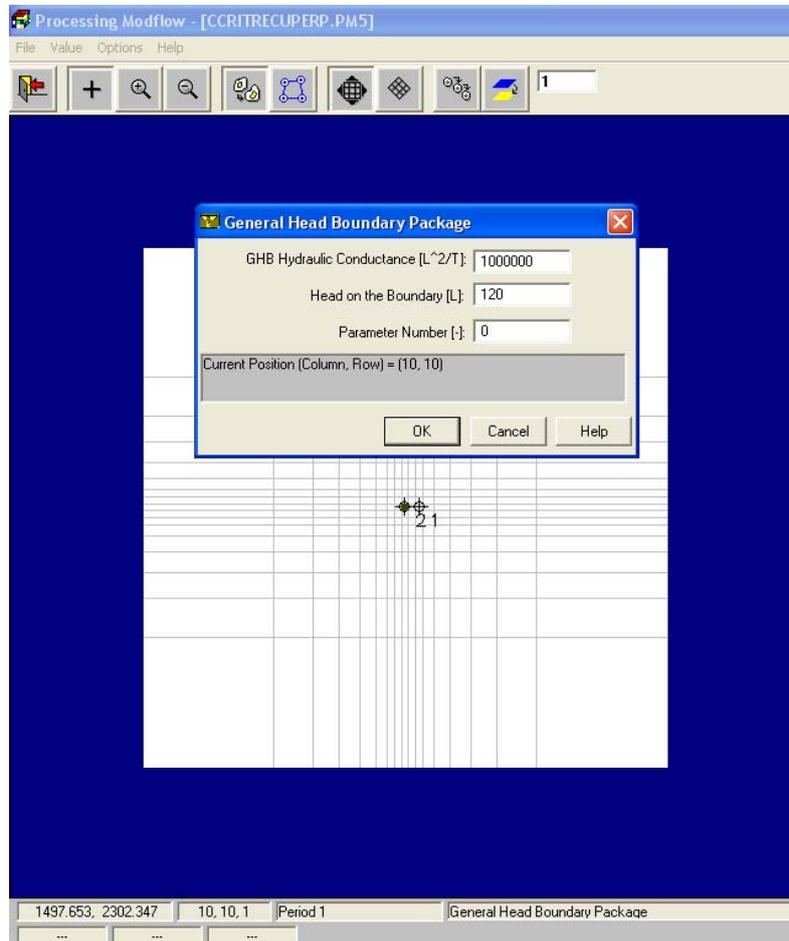
Por lo que una vez alcanzado el nivel de la bomba “d” no es posible mayores descensos por lo que se despeja el valor de Q que será la variable a calcular.

$$\frac{1}{Q} = \frac{0,183}{d \cdot T} \lg \frac{t}{t_0}$$

Esta relación permite observar las variaciones del caudal en función del tiempo.

**Modificaciones de la célula base para la configuración del sistema.**

Se ha simulado en el pozo una conductividad hidráulica de  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  y un nivel piezométrico constante de 120 m frente a los 150 m del resto de las celdas del modelo, y para verificar en la investigación que este pozo se mantiene a nivel constante se ubica un piezómetro en el pozo del que se extraen los datos que confirman tal hipótesis.



*Figura 13. Descripción de las celdas del modelo para régimen transitorio en ensayos de bombeo a caudal crítico.*

**Validación.**

Se ejecutó el modelo una vez introducidos los datos propios de bombeo a caudal crítico y los datos sobre variación de caudal obtenidos del modelo se volcaron en una base de datos (hoja de Excel) donde han sido cotejados con la “serie de datos reales” de variación de caudal la cual no es otra que la serie analítica de Jacob a la cual le hemos despejado el valor del caudal.

$$d = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25Tt}{r^2S} \qquad \frac{1}{Q} = \frac{0,183}{d \cdot T} \lg \frac{t}{t_0}$$

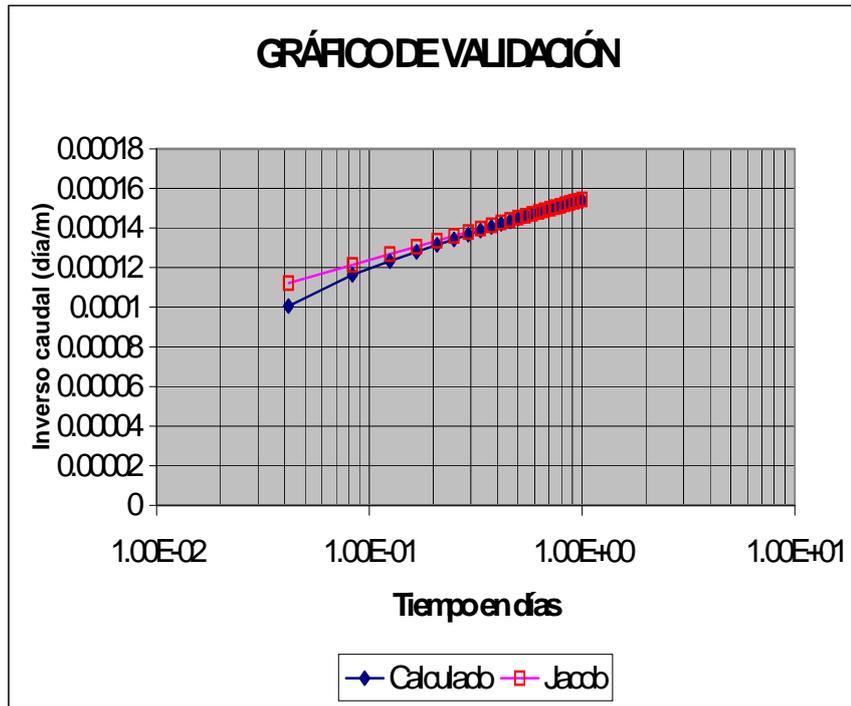


Figura 14 .Gráfico. Inversa del caudal en Bombeo a caudal crítico.

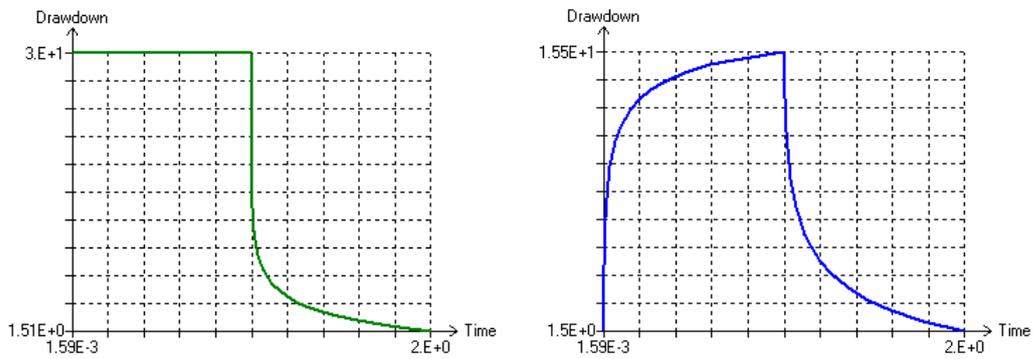


Figura 15. Descensos en el pozo y descenso en el piezómetro. Gráficos de Modflow.

En las curvas de los gráficos se observa que los primeros resultados no se ajustan ello es debido a que nos encontramos en el periodo de no validez, posteriormente entre los valores del inverso del caudal se ajustan a los valores de la “serie de datos reales” calculados por el modelo.

**Por lo que el modelo para el caso de “Bombeo a Caudal Crítico” queda validado.**

## 6 DISEÑO DE METODOS PARA INTERPRETACIÓN DE PARÁMETROS EN FORMACIONES DE BAJA PERMEABILIDAD.

### 6.1 Recuperación en piezómetro después de bombeos a caudal constante.

Los métodos de recuperación consisten en efectuar las interpretaciones del ensayo en base a los datos que se obtienen una vez que el pozo detiene su extracción de agua. A partir de la parada, los niveles empiezan a subir, hasta recuperar total o parcialmente el nivel inicial.

Es lo que dicen los autores que han dedicado su estudio y observación a los ensayos de bombeo en medios permeables, pero ¿qué sucede en el caso de los medios de baja permeabilidad? La investigación llevada a cabo demuestra a modo de orientador que la recuperación en medios de muy baja permeabilidad tales como  $T=0,5$  y  $S=1e-3$ , la recuperación no se produce inicialmente sino que continúa con una inercia de descensos tales que en ciertos casos investigados continúan su descenso más allá del periodo de recuperación ensayado.

En las siguientes figuras se observa las recuperaciones en los diferentes medios expuestos de alta y baja permeabilidad.

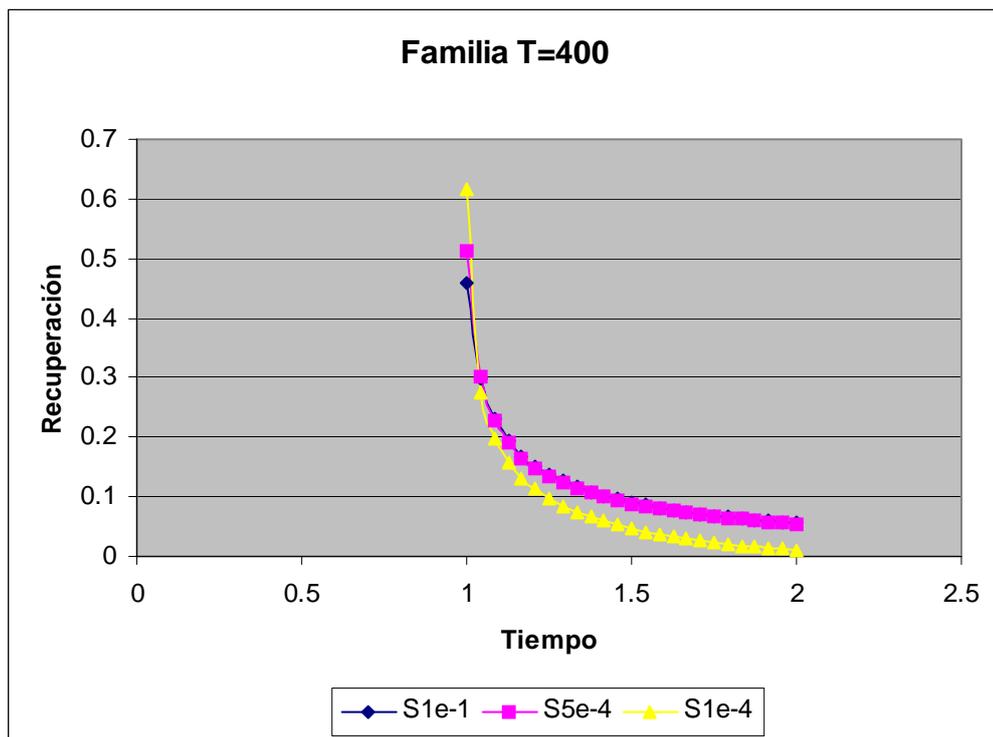


Figura 17. Recuperación en piezómetro en medios de alta permeabilidad. La recuperación es inmediata a la parada del pozo

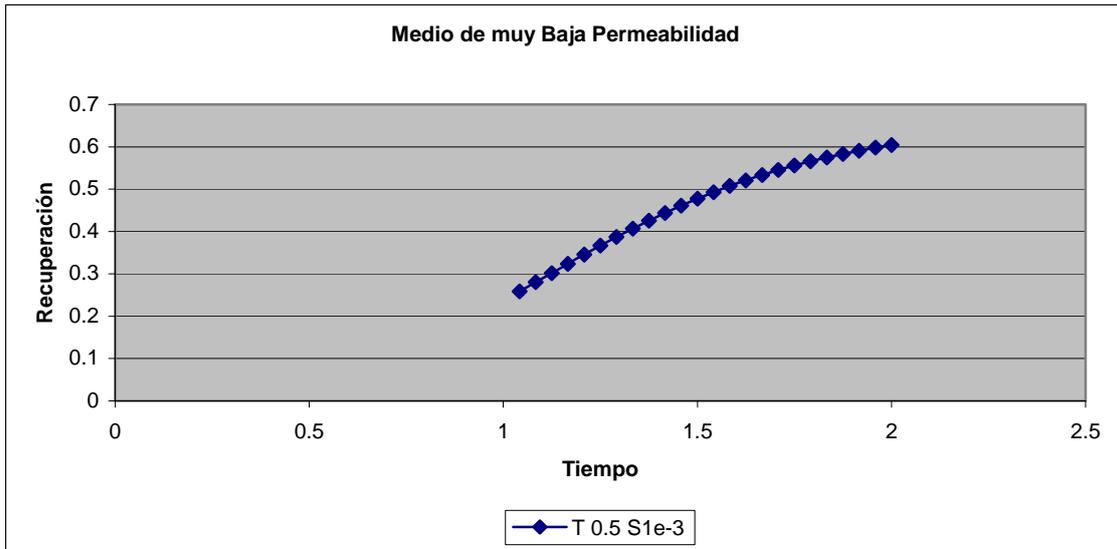


Figura 17. Recuperación en piezómetro en medios de muy baja permeabilidad. Continúan los descensos incluso después de la parada del pozo y la recuperación no se produce dentro del espacio temporal ensayado para la recuperación.

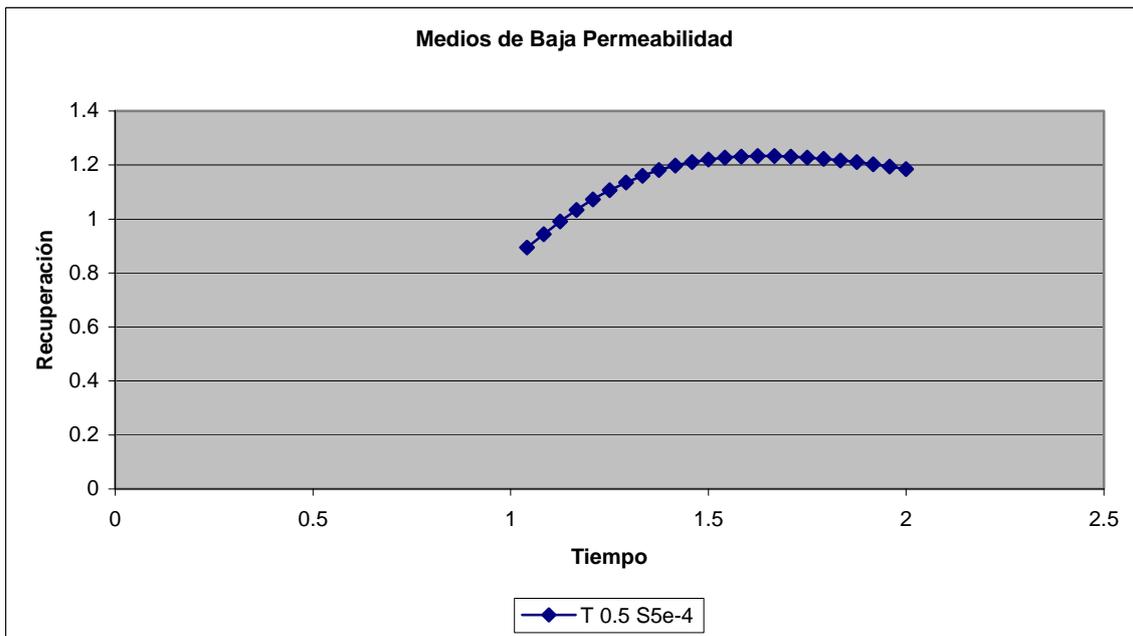


Figura 17. Recuperación en piezómetro en medios de baja permeabilidad. Continúan los descensos incluso después de la parada del pozo y la recuperación comienza a ser visible dentro del espacio temporal ensayado para la recuperación.

La evolución de los niveles después de la parada en el pozo se simulan matemáticamente, mediante el siguiente razonamiento, simulamos que el pozo continua su bombeo y a partir de un instante  $t$  se le inyecta un caudal constante  $Q$  igual al de extracción, y de esta forma se observa el descenso residual debido a la extracción y el ascenso debido a la inyección, a través de la siguiente expresión:

$$d_R = 0,183 \frac{Q}{T} \log \frac{t+t'}{t'}$$

Esta expresión es solo valida para la recuperación en el pozo y en principio no aporta soluciones para la investigación, aunque si va a orientar la investigación a la hora de interpretar los resultados de dicha investigación.

Primer paso dado en la investigación:

Trabajar en la célula específica que tenemos validada y adaptarla al modelo que pretendemos simular, para ello modificaremos los parámetros hidrogeológicos en función de las necesidades previstas:

❖ Medios de Baja Permeabilidad:

$$\begin{array}{l} \text{Coeficiente} \\ \text{Transmisividad (T): } 0,5 \text{ m}^2/\text{día} \\ \text{Coeficiente} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{de almacenamiento S: } 1e-3 \\ \text{Coeficiente de almacenamiento S: } 5e-4 \\ \text{de almacenamiento S: } 1e-4 \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} \text{Coeficiente} \\ \text{Transmisividad (T): } 1 \text{ m}^2/\text{día} \\ \text{Coeficiente} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{de almacenamiento S: } 1e-3 \\ \text{Coeficiente de almacenamiento S: } 5e-4 \\ \text{de almacenamiento S: } 1e-4 \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} \text{Coeficiente} \\ \text{Transmisividad (T): } 2 \text{ m}^2/\text{día} \\ \text{Coeficiente} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{de almacenamiento S: } 1e-3 \\ \text{Coeficiente de almacenamiento S: } 5e-4 \\ \text{de almacenamiento S: } 1e-4 \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} \text{Coeficiente} \\ \text{Transmisividad (T): } 4 \text{ m}^2/\text{día} \\ \text{Coeficiente} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{de almacenamiento S: } 1e-3 \\ \text{Coeficiente de almacenamiento S: } 5e-4 \\ \text{de almacenamiento S: } 1e-4 \end{array} \right.$$

❖ Medios de Alta Permeabilidad:

El motivo de poner medios de alta permeabilidad, no es otro que el verificar por redundancia que los valores obtenidos son coherentes con la realidad.

$$\begin{array}{l} \text{Coeficiente} \\ \text{Transmisividad (T): } 100 \text{ m}^2/\text{día} \\ \text{Coeficiente} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{de almacenamiento S: } 1e-3 \\ \text{Coeficiente de almacenamiento S: } 5e-4 \\ \text{de almacenamiento S: } 1e-4 \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} \text{Coeficiente} \\ \text{Transmisividad (T): } 200 \text{ m}^2/\text{día} \\ \text{Coeficiente} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{de almacenamiento S: } 1e-3 \\ \text{Coeficiente de almacenamiento S: } 5e-4 \\ \text{de almacenamiento S: } 1e-4 \end{array} \right.$$

Coeficiente de almacenamiento (T): 100 m<sup>2</sup>/día  
 Coeficiente de almacenamiento S: 1e-3  
 Coeficiente de almacenamiento S: 5e-4  
 Coeficiente de almacenamiento S: 1e-4

Segundo paso dado en la investigación:

Correr el modelo de simulación con los parámetros anterior es e ir creando una base de datos en un hoja de Excel donde volcamos y recopilamos los datos ofrecidos por Modflow.

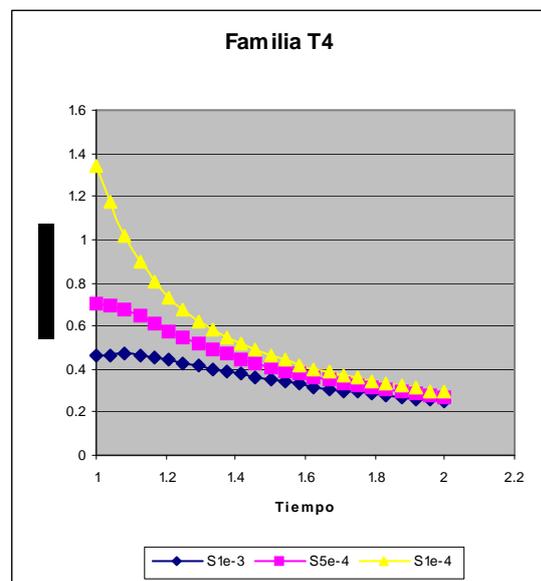
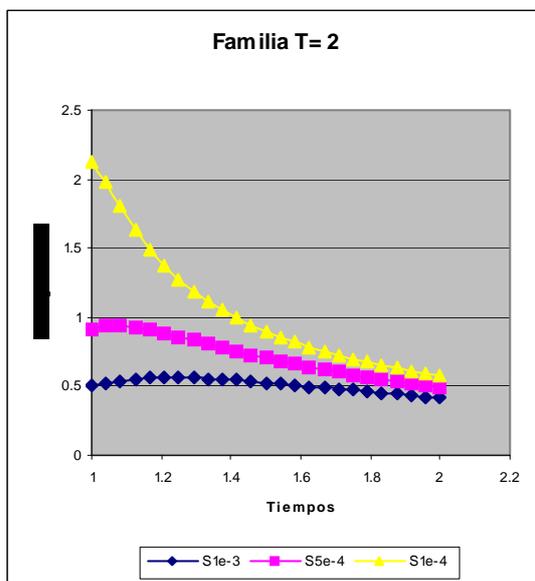
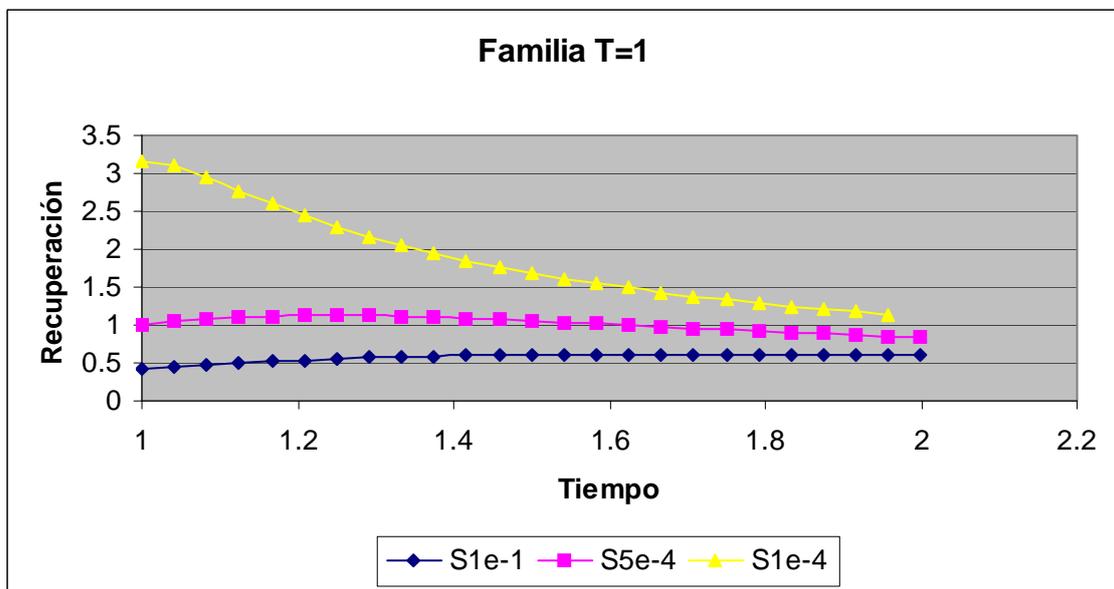
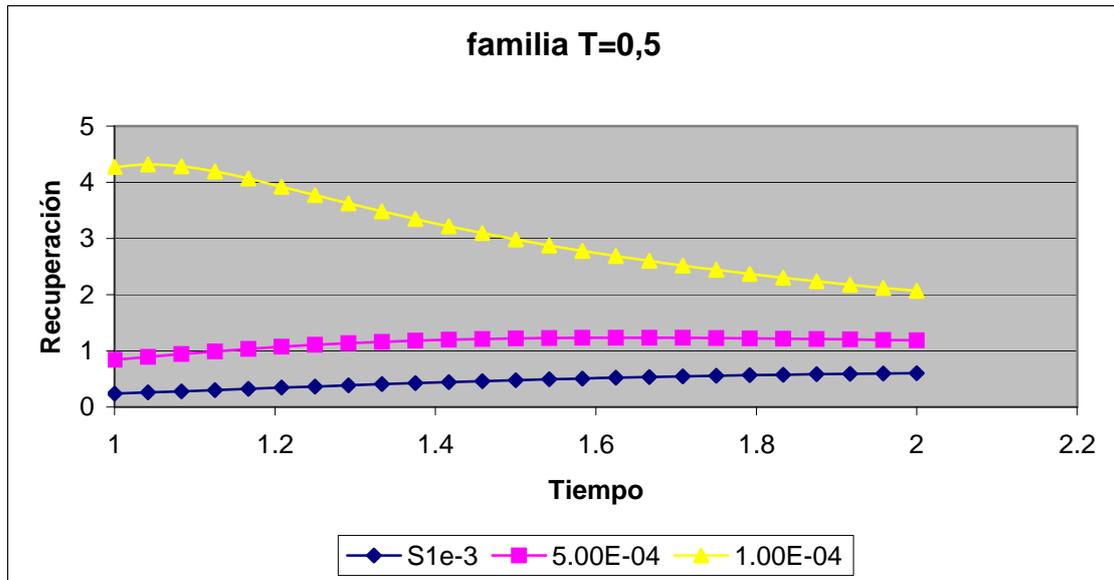
The image shows a detailed view of an Excel spreadsheet. The columns are labeled 'PIEZOMETRO' and 'TIEMPO'. The data is organized into several blocks, each corresponding to a different piezometer. The first block starts with piezometer 1 and time 0. The second block starts with piezometer 2 and time 0. The third block starts with piezometer 3 and time 0. The fourth block starts with piezometer 4 and time 0. The fifth block starts with piezometer 5 and time 0. The sixth block starts with piezometer 6 and time 0. The seventh block starts with piezometer 7 and time 0. The eighth block starts with piezometer 8 and time 0. The ninth block starts with piezometer 9 and time 0. The tenth block starts with piezometer 10 and time 0. The data in the cells consists of numerical values representing the results of the simulation.

Figura 17. Base de datos. Descensos y recuperaciones en función del tiempo, transmisividad y coeficiente de almacenamiento.

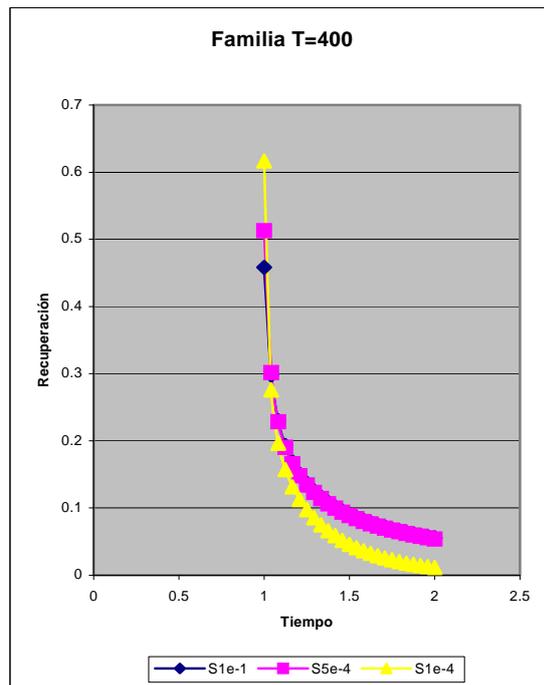
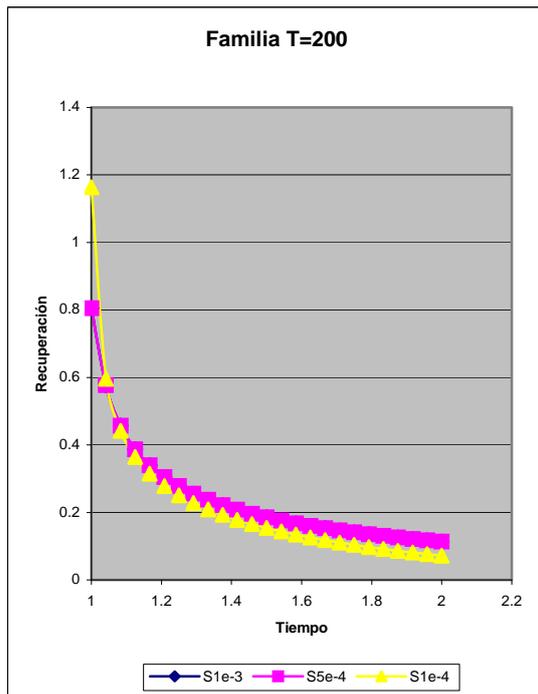
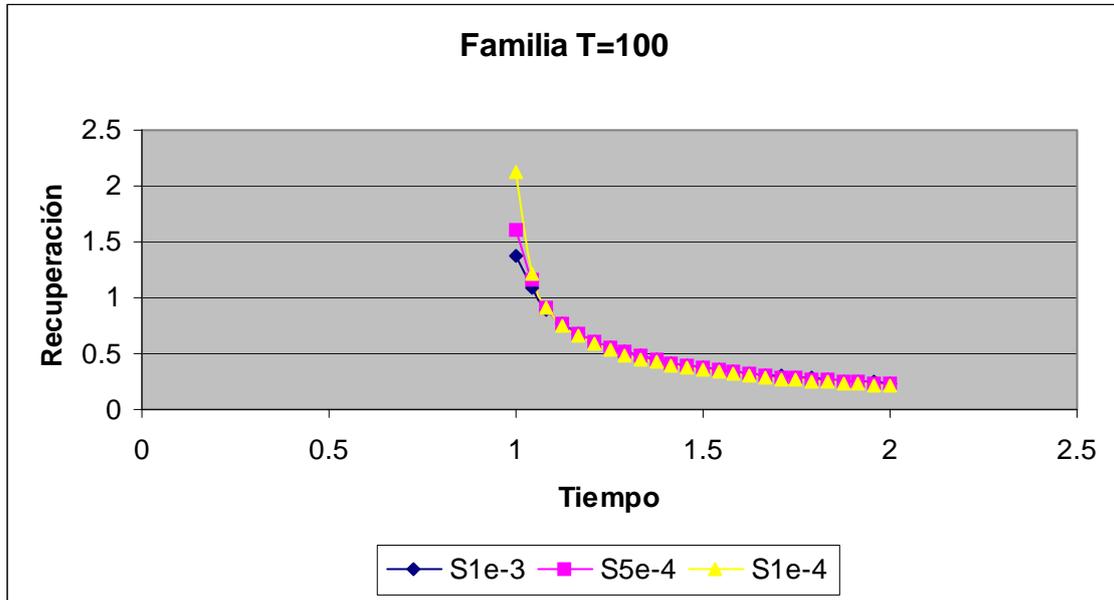
Tercer paso dado en la investigación:

Obtención de familias de las curvas de recuperación agrupadas por transmisividad y coeficiente de almacenamiento.

- Familias de curvas de misma T:
- ❖ Medios de baja permeabilidad:

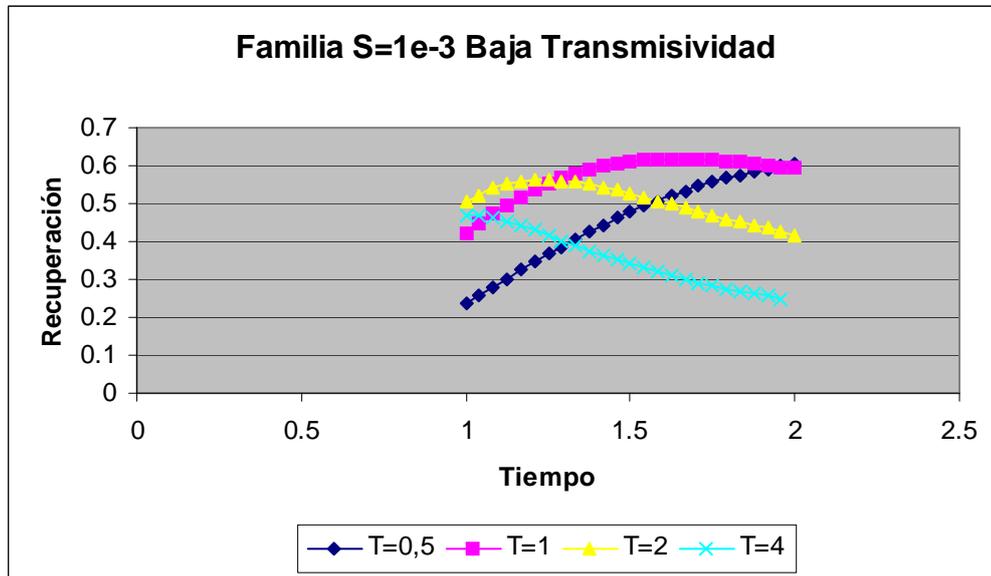


❖ Medios de alta permeabilidad:

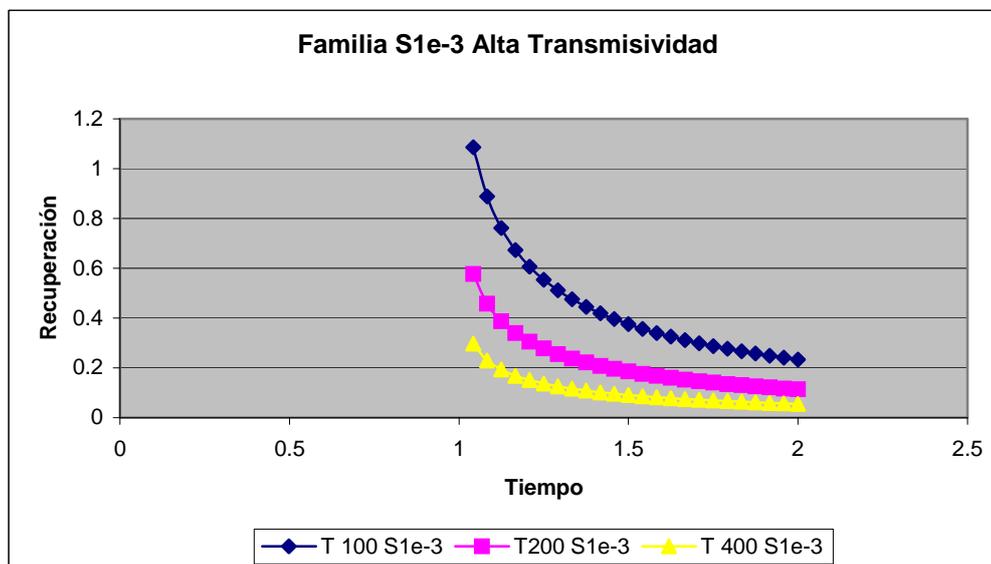


➤ Familias de curvas de mismo  $S:1e-3$ :

❖ Medios de baja permeabilidad:

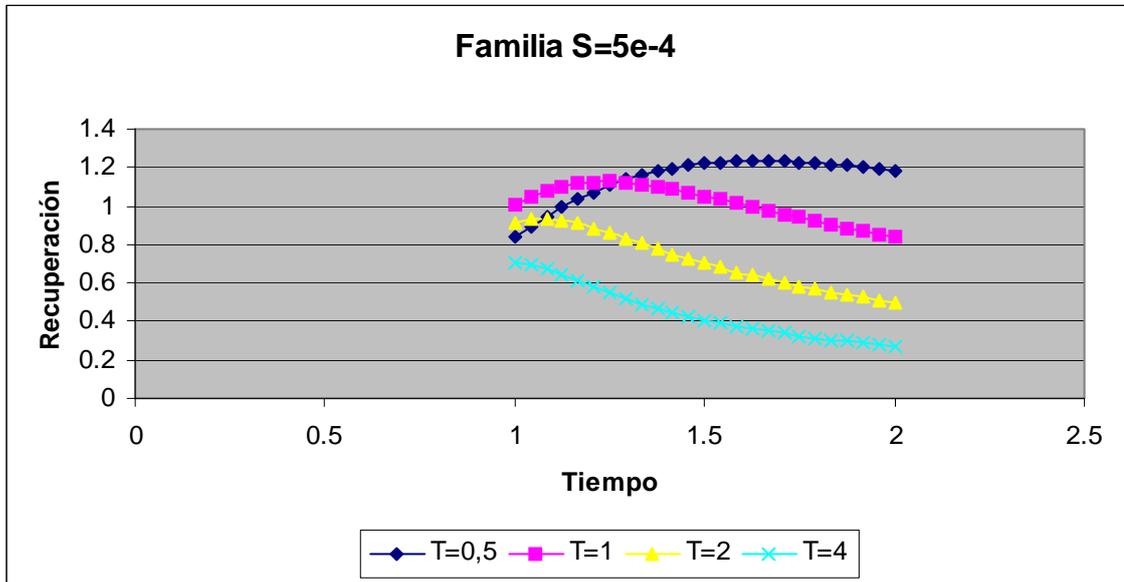


❖ Medios de alta permeabilidad:

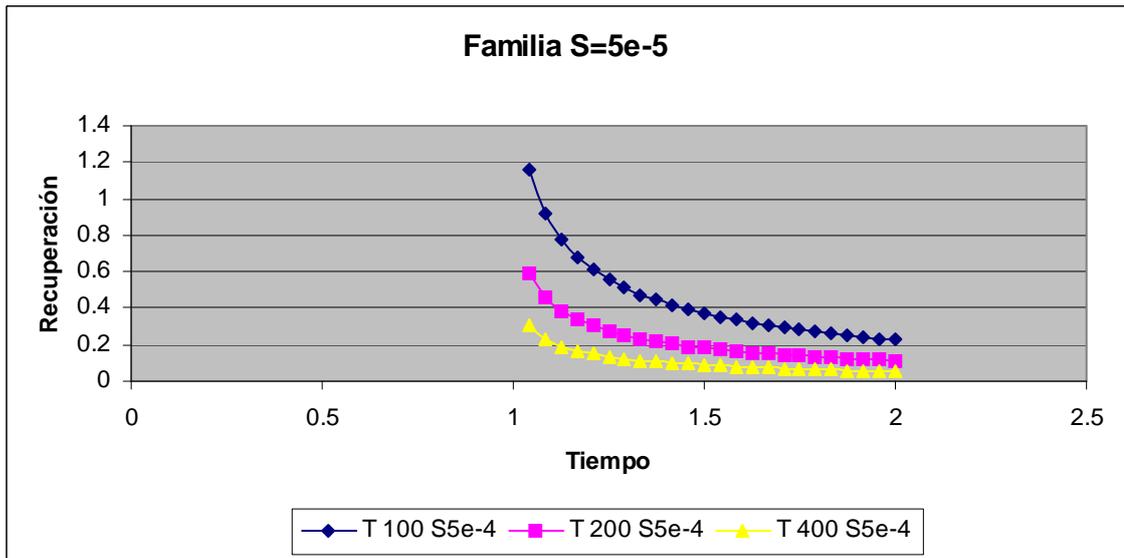


➤ Familias de curvas S:5e-4:

❖ Medios de baja permeabilidad:

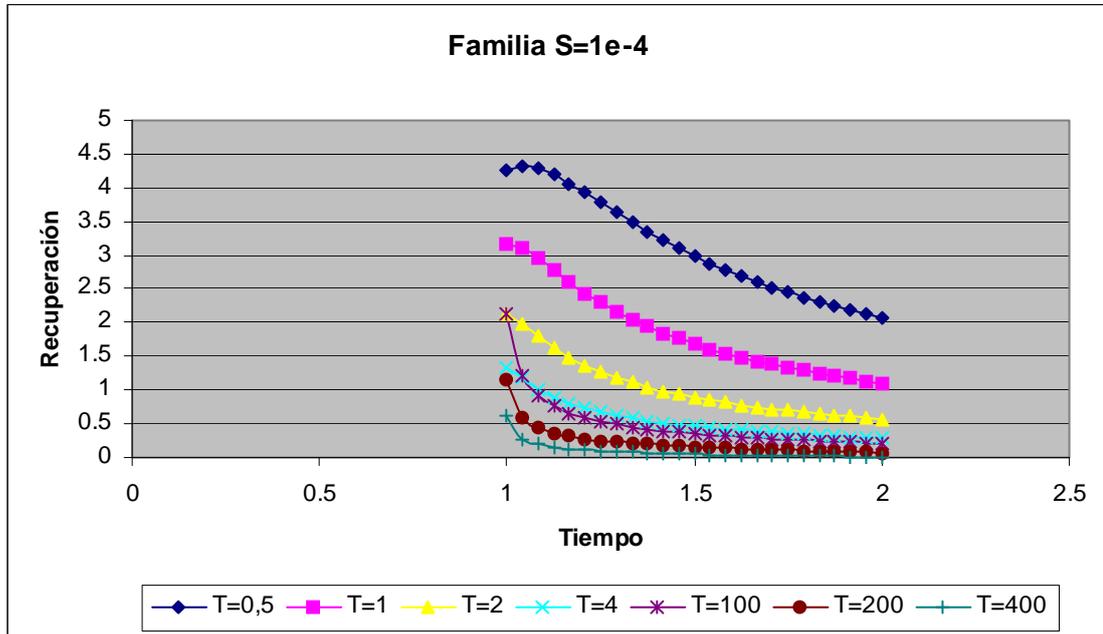


❖ Medios de alta permeabilidad:



➤ Familias de curvas S:1e-4:

❖ Medios de baja / Alta permeabilidad:



Cuarto paso dado en la investigación:

Establecer criterios de difusividad, sabemos que la difusividad queda definida por

$D = \frac{T}{S}$ , por lo que realizando esta división en nuestra base de datos se obtiene los siguientes valores:

T 0.5 S1e-3	T 0.5 S5e-4	T 0.5 S1e-4	T 1 S1e-3	T 1 S5e-4	T 1 S1e-4	T 2 S1e-3
5.00E+02	1.00E+03	5.00E+03	1.00E+03	2.00E+03	1.00E+04	2.00E+03

T 2 S5e-4	T 2 S1e-4	T 4 S1e-3	T 4 S5e-4	T 4 S1e-4	T 100 S1e-3
4.00E+03	2.00E+04	4.00E+03	8.00E+03	4.00E+04	1.00E+05

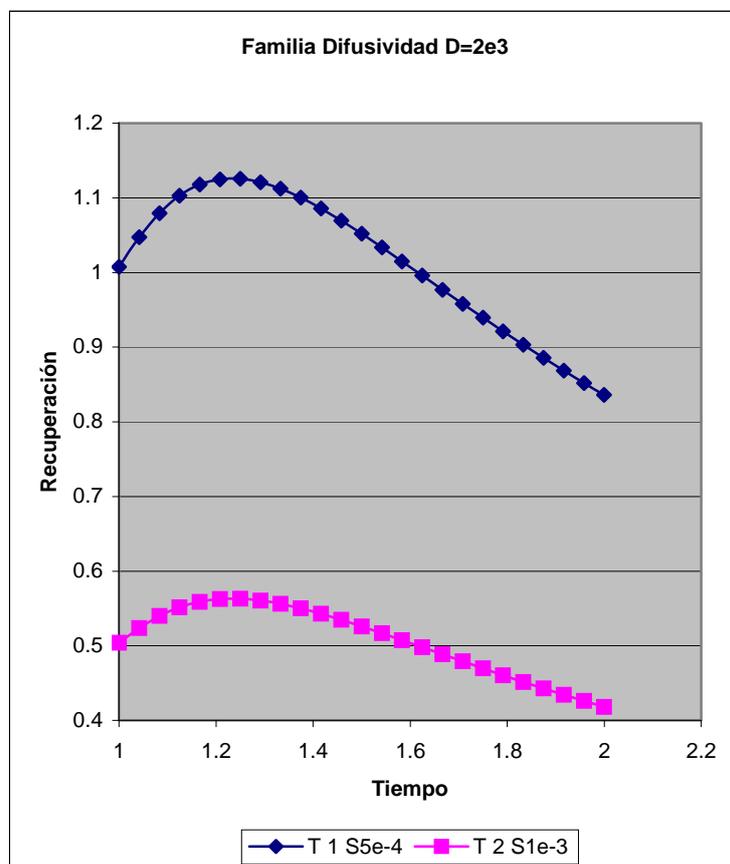
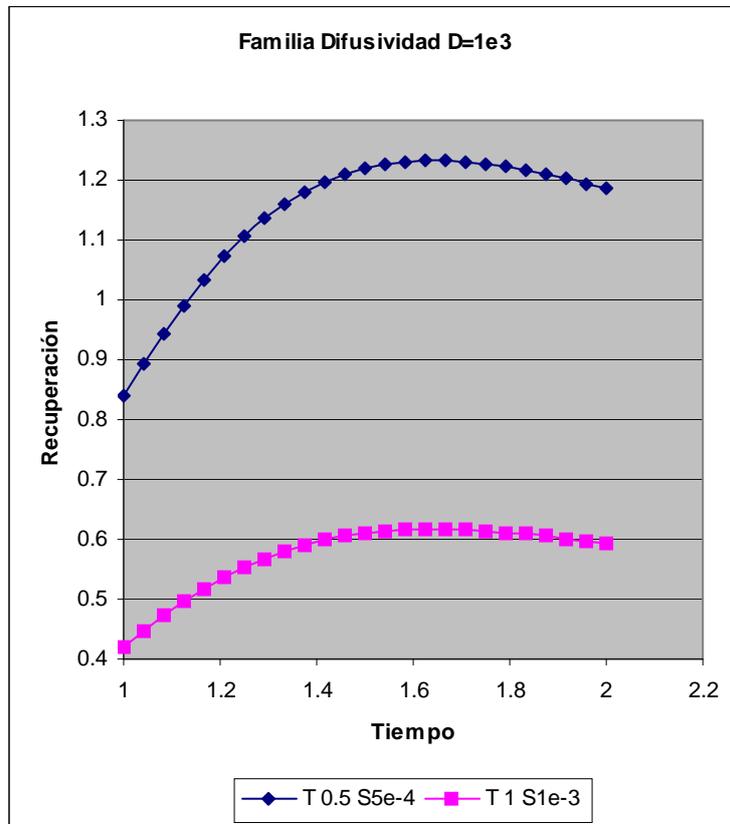
T 100 S5e-4	T 100 S1e-4	T 200 S1e-3	T 200 S5e-4	T 200 S1e-4	T 400 S1e-3	T 400 S5e-4
2.00E+05	1.00E+06	2.00E+05	4.00E+05	2.00E+06	4.00E+05	8.00E+05

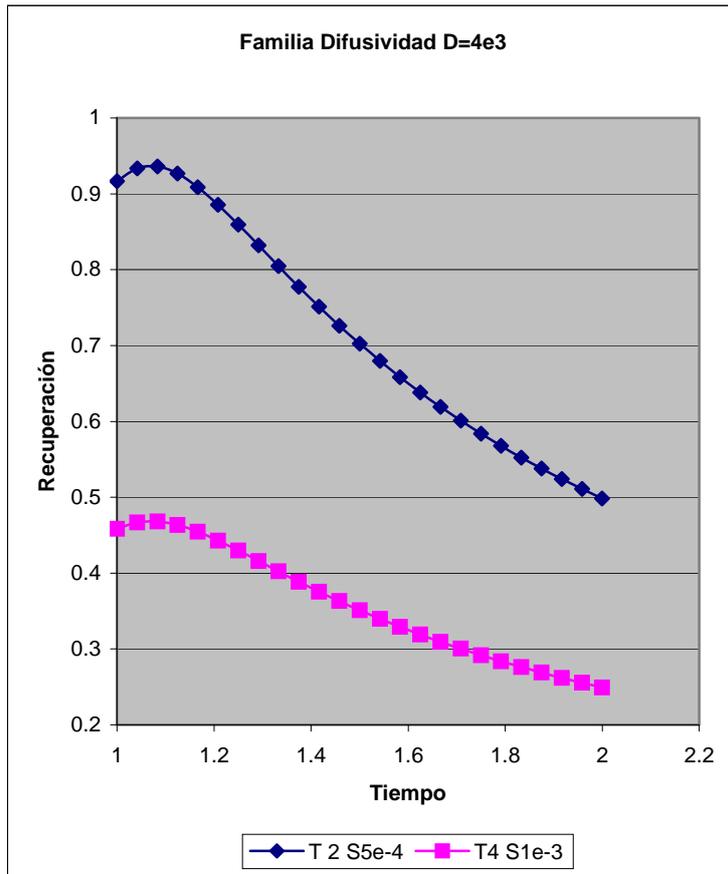
T 400 S1e-4
4.00E+06

Se analizan e interpretan estos valores mediante las curvas que tienen la misma difusividad.

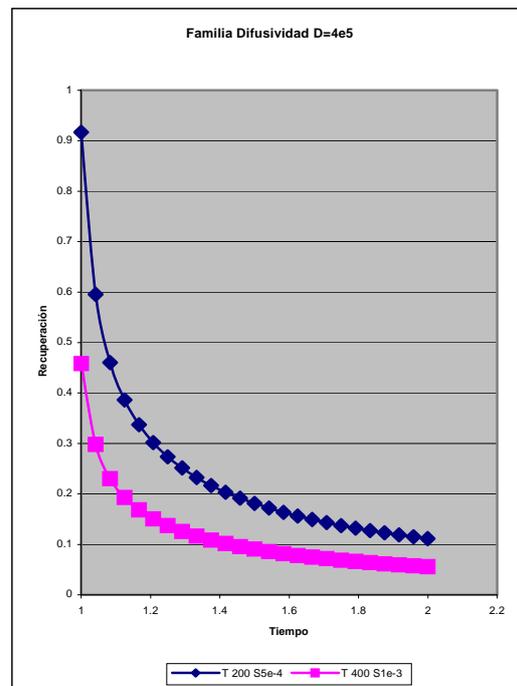
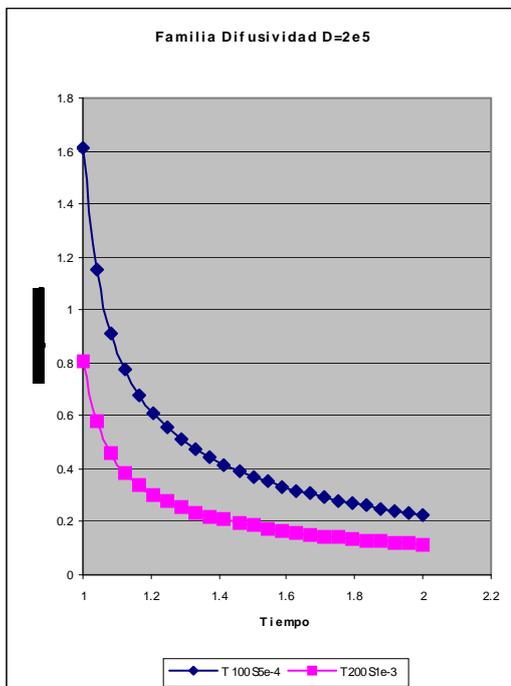
Se observa que para la misma difusividad cuanto mas pequeños sean los valores de T y S las curvas son de mayor rango para medios menos permeables y de menor rango en medios más permeables, como se observa en las siguientes familias de curvas.

❖ Medios de baja permeabilidad:





❖ Medios de alta permeabilidad:

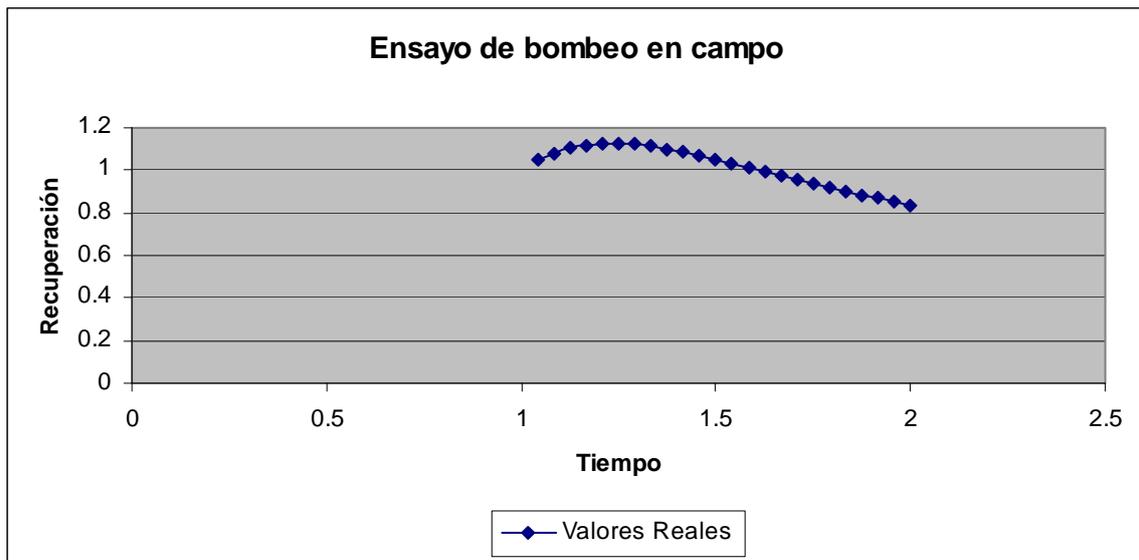


Quinto paso dado en la investigación:

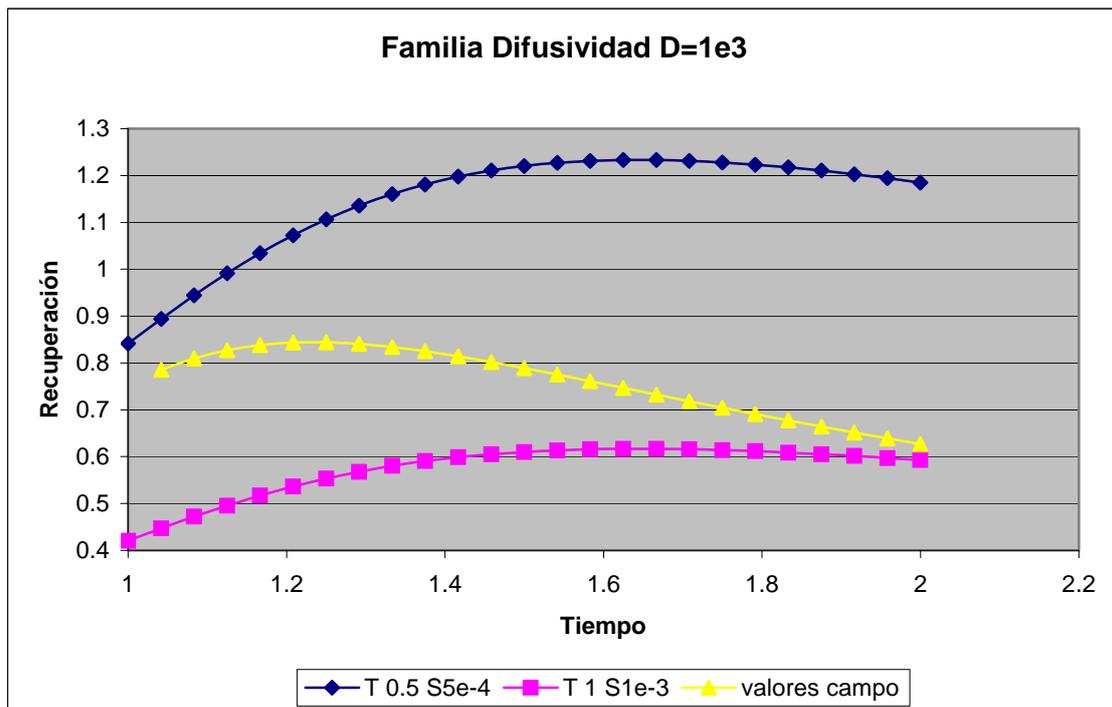
El cuarto paso ha sido fundamental en el desarrollo de esta investigación ya que se ha conseguido obtener una familia de curvas referenciadas a un parámetro fácilmente reconocible en ensayos de bombeo reales en el campo y que previamente no se habían realizado.

En este quinto paso se va a proceder a explicar el método a seguir para obtener los parámetros hidrogeológicos de T y S a partir de los datos obtenidos en el campo.

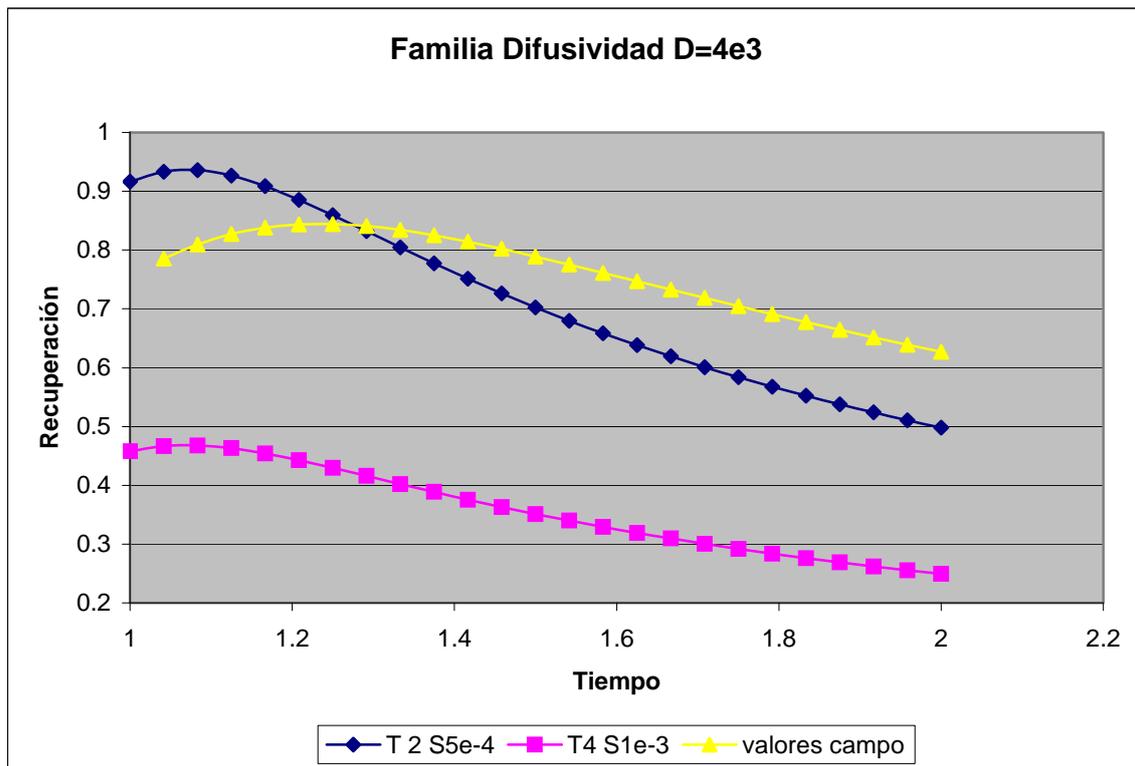
- ✓ Volcar los datos de campo obtenidos en el piezómetro en la base de datos.
- ✓ Dibujar la curva y cotejarlas con las simuladas por el modelo.



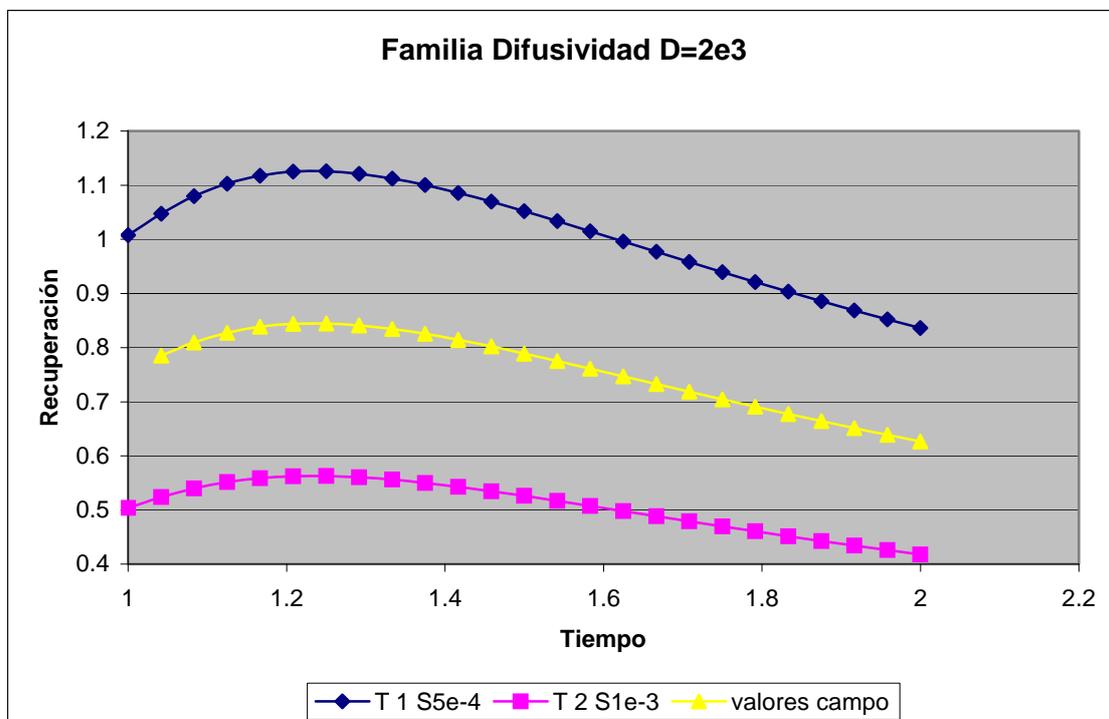
1ª Comparación:



2ª Comparación:

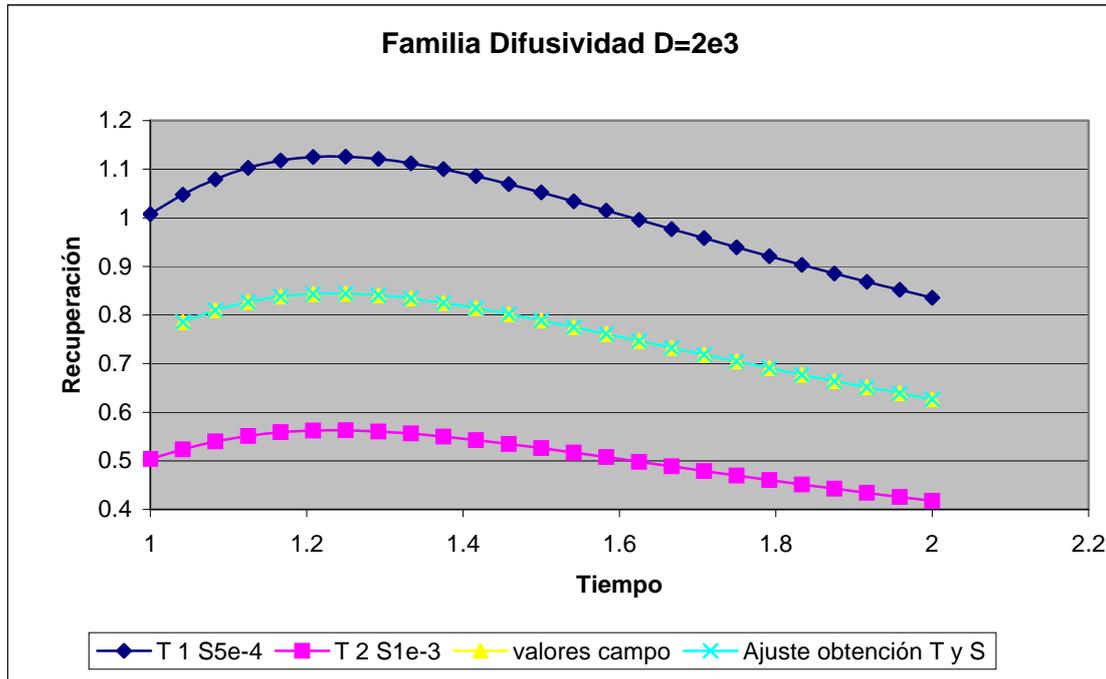


se sigue cotejando la curva de campo hasta que finalmente se encuentra la curva de difusividad a la que pertenece la curva de campo.



✓ Una vez obtenido el valor de la difusividad y sabiendo que este debe permanecer constante, se tantea valores de T y S para ajustar la curva simulada a la obtenida en el

ensayo de campo de esta forma se ha obtenido los valores de T y S del medio poco permeable estudiado y que hasta la fecha de hoy existía solución a esta hipótesis.



De la curva ajustada se obtiene los valores de T= 1,5 y S= 7,5e-4 después una serie de tanteos previos con lo que se demuestra que ya tenemos un método orientativo que permite obtener los valores de T y S en los medios de baja permeabilidad que antes no existía.

## 6.2. Recuperación en pozo después de bombeos a caudal crítico.

Para analizar la evolución de los niveles después de la parada de la bomba en el pozo hay que empezar por simular matemáticamente esta parada, análogamente al apartado anterior, la diferencia entre el descenso producido por el bombeo desde que se inició el mismo y el ascenso producido por la inyección desde la parada, será nuestro descenso residual en la recuperación.

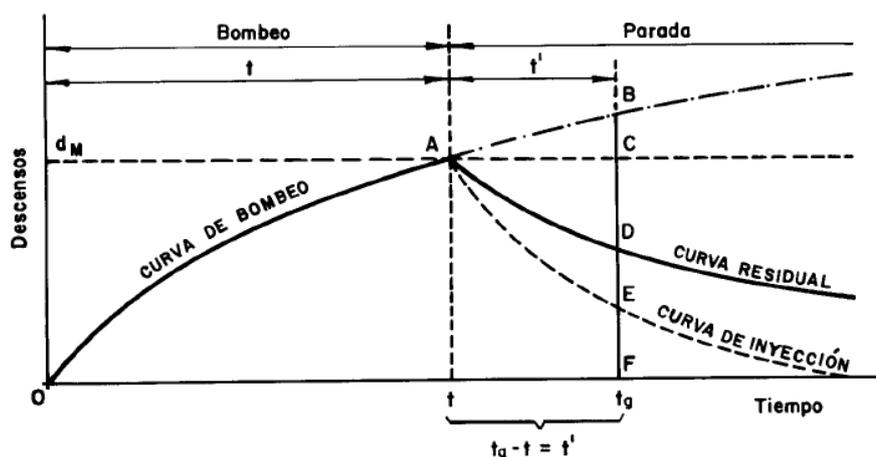


Figura 18. Esquema para la deducción del valor del descenso residual  $d_r$  en el análisis de la recuperación de niveles posterior a la parada.

(Pozos y acuíferos 1984, M. Villanueva y A. Iglesias pg.115)

$$d_R = 0,183 \frac{Q}{T} \log \frac{t+t'}{t'}$$

Esta expresión, en principio, es solo válida para la recuperación en el pozo después de un bombeo a caudal constante, la hipótesis que se plantea el investigador no es otra que demostrar o establecer unos orientadores que permitan obtener los valores de la recuperación en el pozo después de un ensayo de bombeo a caudal crítico.

Esta investigación no acomete el estudio para la obtención de los parámetros hidrogeológicos de transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S), ya que son específicos del acuífero tratado y estos han sido objeto del estudio de D. José María López García, por lo que la investigación ya dispone de estos datos.

Datos que son de utilidad en el caso de la transmisividad (T), necesaria para la obtención de datos en nuestro modelo de simulación y datos como el coeficiente de almacenamiento (S) que no es necesario ya que no afecta a la investigación (el pozo es un espacio vacío por lo que carece de los parámetros hidrogeológicos propios del terreno que le circunscribe, por ende carece de capacidad de almacenamiento).

El planteamiento de la investigación está encaminada a la obtención de un conjunto de valores específicos de la recuperación en el pozo después del bombeo a caudal crítico. Para ello se ha procedido de la siguiente manera:

### Primer paso dado en la investigación:

Trabajar en la célula específica que tenemos validada y adaptarla al modelo que pretendemos simular, para ello modificaremos los parámetros hidrogeológicos en función de las necesidades previstas:

- ❖ Modificar la célula específica desactivando el pozo con bombeo a caudal constante y activando el pozo como bombeo a caudal crítico.

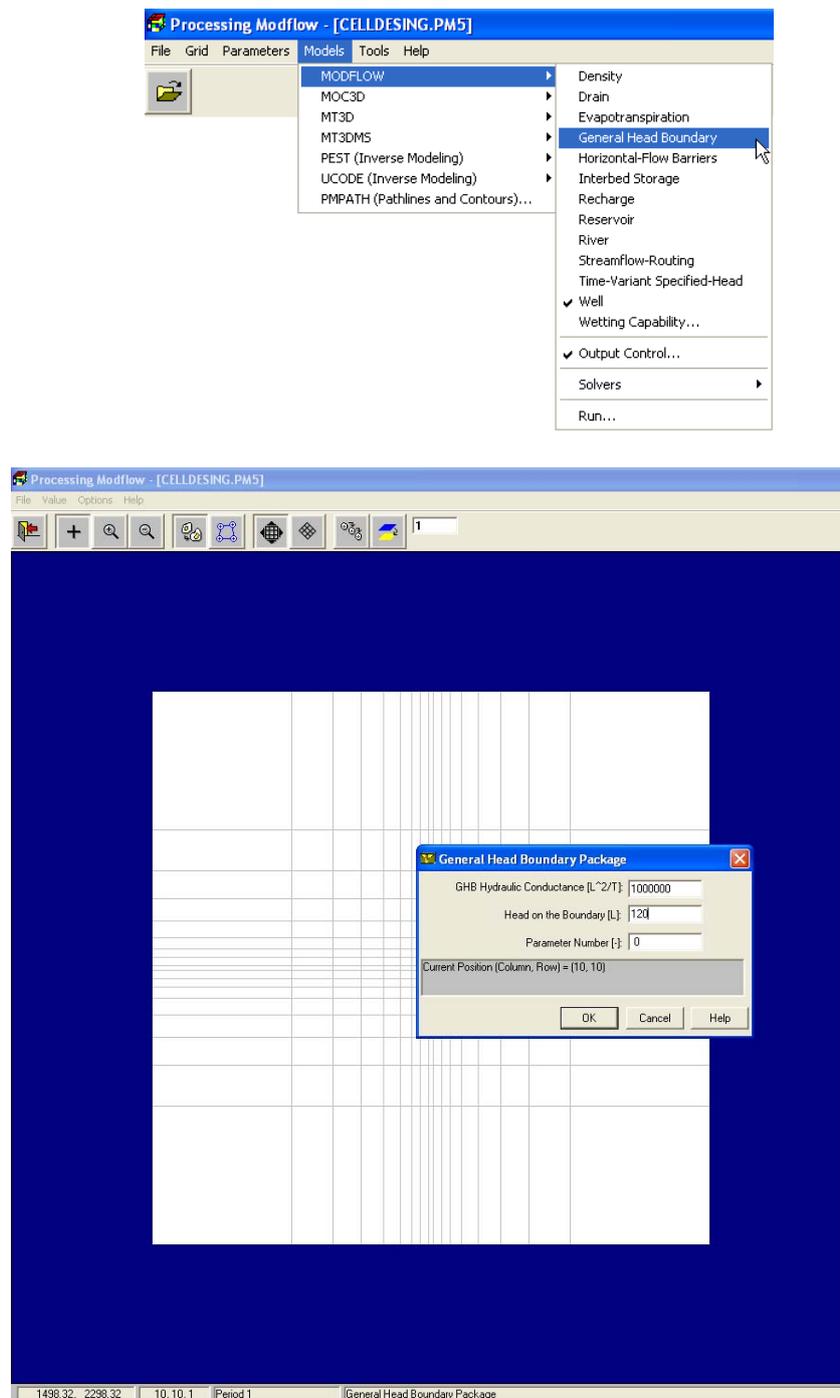


Figura 19. . Descripción de las celdas del modelo para régimen transitorio en ensayos de bombeo a caudal crítico.

Una vez que se ha simulado el bombeo a caudal crítico se introducen los distintos parámetros hidrogeológicos.

❖ Medios de Baja Permeabilidad:

Coeficiente Transmisividad (T): 0,5 m <sup>2</sup> /día Coeficiente	{	de almacenamiento S: 1e-3 Coeficiente de almacenamiento S: 5e-4 de almacenamiento S: 1e-4
---	---	---

Coeficiente Transmisividad (T): 1 m <sup>2</sup> /día Coeficiente	{	de almacenamiento S: 1e-3 Coeficiente de almacenamiento S: 5e-4 de almacenamiento S: 1e-4
---	---	---

Coeficiente Transmisividad (T): 2 m <sup>2</sup> /día Coeficiente	{	de almacenamiento S: 1e-3 Coeficiente de almacenamiento S: 5e-4 de almacenamiento S: 1e-4
---	---	---

Coeficiente Transmisividad (T): 4 m <sup>2</sup> /día Coeficiente	{	de almacenamiento S: 1e-3 Coeficiente de almacenamiento S: 5e-4 de almacenamiento S: 1e-4
---	---	---

❖ Medios de Alta Permeabilidad:

El motivo de poner medios de alta permeabilidad, no es otro que el verificar por redundancia que los valores obtenidos son coherentes con la realidad.

Coeficiente Transmisividad (T): 100 m <sup>2</sup> /día Coeficiente	{	de almacenamiento S: 1e-3 Coeficiente de almacenamiento S: 5e-4 de almacenamiento S: 1e-4
---	---	---

Coeficiente Transmisividad (T): 200 m <sup>2</sup> /día Coeficiente	{	de almacenamiento S: 1e-3 Coeficiente de almacenamiento S: 5e-4 de almacenamiento S: 1e-4
---	---	---

Coeficiente Transmisividad (T): 100 m <sup>2</sup> /día Coeficiente	{	de almacenamiento S: 1e-3 Coeficiente de almacenamiento S: 5e-4 de almacenamiento S: 1e-4
---	---	---

Segundo paso dado en la investigación:

Correr el modelo de simulación con los parámetros anterior es e ir creando una base de datos en un hoja de Excel donde volcamos y recopilamos los datos ofrecidos por Modflow.

Time	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
1	4.47E-02	28.42524	36.84594	36.53586	35.58935	34.66677	33.97921	33.59582	33.06445	32.28804	4.45322	4.73842	5.03274	4.62833	4.82444	5.02725	2.42527	2.54848	2.68351	2.78249	2.82222	4.42279	4.62279	4.82279	4.92279	5.02279	5.12279	5.22279	5.32279	5.42279	5.52279	5.62279	5.72279	5.82279	5.92279	6.02279	6.12279	6.22279	6.32279	6.42279	6.52279	6.62279	6.72279	6.82279	6.92279	7.02279	7.12279	7.22279	7.32279	7.42279	7.52279	7.62279	7.72279	7.82279	7.92279	8.02279	8.12279	8.22279	8.32279	8.42279	8.52279	8.62279	8.72279	8.82279	8.92279	9.02279	9.12279	9.22279	9.32279	9.42279	9.52279	9.62279	9.72279	9.82279	9.92279	10.02279	10.12279	10.22279	10.32279	10.42279	10.52279	10.62279	10.72279	10.82279	10.92279	11.02279	11.12279	11.22279	11.32279	11.42279	11.52279	11.62279	11.72279	11.82279	11.92279	12.02279	12.12279	12.22279	12.32279	12.42279	12.52279	12.62279	12.72279	12.82279	12.92279	13.02279	13.12279	13.22279	13.32279	13.42279	13.52279	13.62279	13.72279	13.82279	13.92279	14.02279	14.12279	14.22279	14.32279	14.42279	14.52279	14.62279	14.72279	14.82279	14.92279	15.02279	15.12279	15.22279	15.32279	15.42279	15.52279	15.62279	15.72279	15.82279	15.92279	16.02279	16.12279	16.22279	16.32279	16.42279	16.52279	16.62279	16.72279	16.82279	16.92279	17.02279	17.12279	17.22279	17.32279	17.42279	17.52279	17.62279	17.72279	17.82279	17.92279	18.02279	18.12279	18.22279	18.32279	18.42279	18.52279	18.62279	18.72279	18.82279	18.92279	19.02279	19.12279	19.22279	19.32279	19.42279	19.52279	19.62279	19.72279	19.82279	19.92279	20.02279	20.12279	20.22279	20.32279	20.42279	20.52279	20.62279	20.72279	20.82279	20.92279	21.02279	21.12279	21.22279	21.32279	21.42279	21.52279	21.62279	21.72279	21.82279	21.92279	22.02279	22.12279	22.22279	22.32279	22.42279	22.52279	22.62279	22.72279	22.82279	22.92279	23.02279	23.12279	23.22279	23.32279	23.42279	23.52279	23.62279	23.72279	23.82279	23.92279	24.02279	24.12279	24.22279	24.32279	24.42279	24.52279	24.62279	24.72279	24.82279	24.92279	25.02279	25.12279	25.22279	25.32279	25.42279	25.52279	25.62279	25.72279	25.82279	25.92279	26.02279	26.12279	26.22279	26.32279	26.42279	26.52279	26.62279	26.72279	26.82279	26.92279	27.02279	27.12279	27.22279	27.32279	27.42279	27.52279	27.62279	27.72279	27.82279	27.92279	28.02279	28.12279	28.22279	28.32279	28.42279	28.52279	28.62279	28.72279	28.82279	28.92279	29.02279	29.12279	29.22279	29.32279	29.42279	29.52279	29.62279	29.72279	29.82279	29.92279	30.02279	30.12279	30.22279	30.32279	30.42279	30.52279	30.62279	30.72279	30.82279	30.92279	31.02279	31.12279	31.22279	31.32279	31.42279	31.52279	31.62279	31.72279	31.82279	31.92279	32.02279	32.12279	32.22279	32.32279	32.42279	32.52279	32.62279	32.72279	32.82279	32.92279	33.02279	33.12279	33.22279	33.32279	33.42279	33.52279	33.62279	33.72279	33.82279	33.92279	34.02279	34.12279	34.22279	34.32279	34.42279	34.52279	34.62279	34.72279	34.82279	34.92279	35.02279	35.12279	35.22279	35.32279	35.42279	35.52279	35.62279	35.72279	35.82279	35.92279	36.02279	36.12279	36.22279	36.32279	36.42279	36.52279	36.62279	36.72279	36.82279	36.92279	37.02279	37.12279	37.22279	37.32279	37.42279	37.52279	37.62279	37.72279	37.82279	37.92279	38.02279	38.12279	38.22279	38.32279	38.42279	38.52279	38.62279	38.72279	38.82279	38.92279	39.02279	39.12279	39.22279	39.32279	39.42279	39.52279	39.62279	39.72279	39.82279	39.92279	40.02279	40.12279	40.22279	40.32279	40.42279	40.52279	40.62279	40.72279	40.82279	40.92279	41.02279	41.12279	41.22279	41.32279	41.42279	41.52279	41.62279	41.72279	41.82279	41.92279	42.02279	42.12279	42.22279	42.32279	42.42279	42.52279	42.62279	42.72279	42.82279	42.92279	43.02279	43.12279	43.22279	43.32279	43.42279	43.52279	43.62279	43.72279	43.82279	43.92279	44.02279	44.12279	44.22279	44.32279	44.42279	44.52279	44.62279	44.72279	44.82279	44.92279	45.02279	45.12279	45.22279	45.32279	45.42279	45.52279	45.62279	45.72279	45.82279	45.92279	46.02279	46.12279	46.22279	46.32279	46.42279	46.52279	46.62279	46.72279	46.82279	46.92279	47.02279	47.12279	47.22279	47.32279	47.42279	47.52279	47.62279	47.72279	47.82279	47.92279	48.02279	48.12279	48.22279	48.32279	48.42279	48.52279	48.62279	48.72279	48.82279	48.92279	49.02279	49.12279	49.22279	49.32279	49.42279	49.52279	49.62279	49.72279	49.82279	49.92279	50.02279	50.12279	50.22279	50.32279	50.42279	50.52279	50.62279	50.72279	50.82279	50.92279	51.02279	51.12279	51.22279	51.32279	51.42279	51.52279	51.62279	51.72279	51.82279	51.92279	52.02279	52.12279	52.22279	52.32279	52.42279	52.52279	52.62279	52.72279	52.82279	52.92279	53.02279	53.12279	53.22279	53.32279	53.42279	53.52279	53.62279	53.72279	53.82279	53.92279	54.02279	54.12279	54.22279	54.32279	54.42279	54.52279	54.62279	54.72279	54.82279	54.92279	55.02279	55.12279	55.22279	55.32279	55.42279	55.52279	55.62279	55.72279	55.82279	55.92279	56.02279	56.12279	56.22279	56.32279	56.42279	56.52279	56.62279	56.72279	56.82279	56.92279	57.02279	57.12279	57.22279	57.32279	57.42279	57.52279	57.62279	57.72279	57.82279	57.92279	58.02279	58.12279	58.22279	58.32279	58.42279	58.52279	58.62279	58.72279	58.82279	58.92279	59.02279	59.12279	59.22279	59.32279	59.42279	59.52279	59.62279	59.72279	59.82279	59.92279	60.02279	60.12279	60.22279	60.32279	60.42279	60.52279	60.62279	60.72279	60.82279	60.92279	61.02279	61.12279	61.22279	61.32279	61.42279	61.52279	61.62279	61.72279	61.82279	61.92279	62.02279	62.12279	62.22279	62.32279	62.42279	62.52279	62.62279	62.72279	62.82279	62.92279	63.02279	63.12279	63.22279	63.32279	63.42279	63.52279	63.62279	63.72279	63.82279	63.92279	64.02279	64.12279	64.22279	64.32279	64.42279	64.52279	64.62279	64.72279	64.82279	64.92279	65.02279	65.12279	65.22279	65.32279	65.42279	65.52279	65.62279	65.72279	65.82279	65.92279	66.02279	66.12279	66.22279	66.32279	66.42279	66.52279	66.62279	66.72279	66.82279	66.92279	67.02279	67.12279	67.22279	67.32279	67.42279	67.52279	67.62279	67.72279	67.82279	67.92279	68.02279	68.12279	68.22279	68.32279	68.42279	68.52279	68.62279	68.72279	68.82279	68.92279	69.02279	69.12279	69.22279	69.32279	69.42279	69.52279	69.62279	69.72279	69.82279	69.92279	70.02279	70.12279	70.22279	70.32279	70.42279	70.52279	70.62279	70.72279	70.82279	70.92279	71.02279	71.12279	71.22279	71.32279	71.42279	71.52279	71.62279	71.72279	71.82279	71.92279	72.02279	72.12279	72.22279	72.32279	72.42279	72.52279	72.62279	72.72279	72.82279	72.92279	73.02279	73.12279	73.22279	73.32279	73.42279	73.52279	73.62279	73.72279	73.82279	73.92279	74.02279	74.12279	74.22279	74.32279	74.42279	74.52279	74.62279	74.72279	74.82279	74.92279	75.02279	75.12279	75.22279	75.32279	75.42279	75.52279	75.62279	75.72279	75.82279	75.92279	76.02279	76.12279	76.22279	76.32279	76.42279	76.52279	76.62279	76.72279	76.82279	76.92279	77.02279	77.12279	77.22279	77.32279	77.42279	77.52279	77.62279	77.72279	77.82279	77.92279	78.02279	78.12279	78.22279	78.32279	78.42279	78.52279	78.62279	78.72279	78.82279	78.92279	79.02279	79.12279	79.22279	79.32279	79.42279	79.52279	79.62279	79.72279	79.82279	79.92279	80.02279	80.12279	80.22279	80.32279	80.42279	80.52279	80.62279	80.72279	80.82279	80.92279	81.02279	81.12279	81.22279	81.32279	81.42279	81.52279	81.62279	81.72279	81.82279	81.92279	82.02279	82.12279	82.22279	82.32279	82.42279	82.52279	82.62279	82.72279	82.82279	82.92279	83.02279	83.12279	83.22279	83.32279	83.42279	83.52279	83.62279	8

Cuarto paso dado en la investigación:

Todas estas familias de curvas, han permitido disponer de un conjunto informativo de evoluciones de la recuperación en el pozo después de un bombeo a caudal crítico, lo cual será base de investigaciones tendentes a una mejora del método de recuperación, que hasta el momento no se ha encontrado en esta investigación.

Sin embargo, en la recuperación, como se ha visto, cuando el caudal de bombeo es variable, se utiliza el caudal medio ponderado. Esto se ha probado como válido cuando la variación del caudal es de escasa importancia (p.e. variaciones debidas a descenso del nivel que hacen que la bomba tenga que elevar una mayor altura manométrica y disminuir progresivamente el caudal de bombeo). Sin embargo, no se ha demostrado una validez importante cuando los caudales varían fuertemente (en agotamiento hacia el pozo) cuando se produce un bombeo a caudal crítico.

Los caudales durante el régimen de bombeo han variado en relación con el tiempo, por lo que la investigación se centra en la realización de otra base de datos en la que figuran dichos caudales (estos son específicos para cada intervalo de tiempo, T y S).

$Q_1$  durante el tiempo  $t_1$

$Q_2$  durante el tiempo  $t_2$

$Q_3$  durante el tiempo  $t_3$

-----

$Q_n$  durante el tiempo  $t_n$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	tiempo	modelo Q	Qt	Q ponderado	T	S	d bombeo	1/Q	jacobs	
2	4,17E-02	9947,0654	4,14E+02		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000100532	0,00012231	
3	8,33E-02	8596,5029	7,16E+02		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,00016326	0,00012143	
4	0,125	8108,6978	1,01E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000123324	0,000126784	
5	0,16667	7815,0332	1,30E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000127959	0,000130594	
6	0,20833	7607,0415	1,58E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000131457	0,00013355	
7	0,25	7446,9272	1,86E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000134284	0,000135965	
8	0,29167	7317,5161	2,13E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000136658	0,000138007	
9	0,33333	7211,0288	2,40E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000138676	0,000139775	
10	0,375	7117,7524	2,67E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000140494	0,000141336	
11	0,41667	7038,3057	2,93E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,00014208	0,000142731	
12	0,45833	6968,7871	3,19E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000143497	0,000143994	
13	0,5	6907,3721	3,45E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000144773	0,000145146	
14	0,54167	6852,6802	3,71E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000145928	0,000146207	
15	0,58333	6803,6421	3,97E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,00014698	0,000147188	
16	0,625	6759,4136	4,22E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000147942	0,000148102	
17	0,66667	6719,314	4,48E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000148825	0,000148957	
18	0,70833	6682,7939	4,73E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000149638	0,00014976	
19	0,75	6649,3999	4,99E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000150393	0,000150517	
20	0,79167	6618,7593	5,24E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000151086	0,000151233	
21	0,83333	6590,5591	5,49E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000151732	0,000151913	
22	0,875	6564,5366	5,74E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000152334	0,000152559	
23	0,91667	6540,4678	6,00E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000152894	0,000153176	
24	0,95833	6518,1606	6,25E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000153418	0,000153764	
25	1	6497,4521	6,50E+03	6,80E-03	2,00E+02	5,00E-04	3,00E-01	0,000153906	0,000154328	
26	<b>SUMA</b>		<b>SUMA</b>	<b>Q ponderado</b>						
27	1,25E+01		9,50E+04	6,80E-02			<b>d residual</b>	<b>(t-t')/t'</b>	<b>dr Qponderado</b>	
28	1,04E+00	9947,0654	1,04E+04		2,00E+02	5,00E-04	1,27234E+01	2,50E+01	8,70E+00	
29	1,08E+00	8596,5029	9,31E+03		2,00E+02	5,00E-04	8,76208E+00	1,30E+01	6,93E+00	
30	1,13E+00	8108,6978	9,12E+03		2,00E+02	5,00E-04	7,07996E+00	9,00E+00	5,94E+00	
31	1,17E+00	7815,0332	9,12E+03		2,00E+02	5,00E-04	6,04304E+00	7,00E+00	5,26E+00	
32	1,21E+00	7607,0415	9,19E+03		2,00E+02	5,00E-04	5,31384E+00	5,80E+00	4,75E+00	
33	1,25E+00	7446,9272	9,31E+03		2,00E+02	5,00E-04	4,76274E+00	5,00E+00	4,35E+00	
34	1,29E+00	7317,5161	9,45E+03		2,00E+02	5,00E-04	4,32705E+00	4,43E+00	4,02E+00	
35	1,33E+00	7211,0288	9,61E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,97247E+00	4,00E+00	3,75E+00	
36	1,38E+00	7117,7524	9,79E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,67496E+00	3,67E+00	3,51E+00	
37	1,42E+00	7038,3057	9,97E+03		2,00E+02	5,00E-04	3,42273E+00	3,40E+00	3,31E+00	
38	1,46E+00	6968,7871	1,02E+04		2,00E+02	5,00E-04	3,20529E+00	3,18E+00	3,19E+00	
39	1,50E+00	6907,3721	1,04E+04		2,00E+02	5,00E-04	3,01552E+00	3,00E+00	2,97E+00	
40	1,54E+00	6852,6802	1,06E+04		2,00E+02	5,00E-04	2,84828E+00	2,85E+00	2,83E+00	
41	1,58E+00	6803,6421	1,08E+04		2,00E+02	5,00E-04	2,69966E+00	2,71E+00	2,70E+00	
42	1,63E+00	6759,4136	1,10E+04		2,00E+02	5,00E-04	2,56855E+00	2,60E+00	2,58E+00	
43	1,67E+00	6719,314	1,12E+04		2,00E+02	5,00E-04	2,44660E+00	2,50E+00	2,48E+00	
44	1,71E+00	6682,7939	1,14E+04		2,00E+02	5,00E-04	2,33789E+00	2,41E+00	2,39E+00	
45	1,75E+00	6649,3999	1,16E+04		2,00E+02	5,00E-04	2,23884E+00	2,33E+00	2,29E+00	
46	1,79E+00	6618,7593	1,18E+04		2,00E+02	5,00E-04	2,14821E+00	2,26E+00	2,21E+00	
47	1,83E+00	6590,5591	1,21E+04		2,00E+02	5,00E-04	2,06494E+00	2,20E+00	2,13E+00	
48	1,88E+00	6564,5366	1,23E+04		2,00E+02	5,00E-04	1,98813E+00	2,14E+00	2,06E+00	
49	1,92E+00	6540,4678	1,25E+04		2,00E+02	5,00E-04	1,91705E+00	2,09E+00	1,99E+00	
50	1,96E+00	6518,1606	1,28E+04		2,00E+02	5,00E-04	1,85109E+00	2,04E+00	1,93E+00	
51	2,00E+00	6497,4521	1,30E+04		2,00E+02	5,00E-04	1,78967E+00	2,00E+00	1,87E+00	
52	<b>SUMA</b>		<b>SUMA</b>	<b>Q ponderado</b>						
53	3,85E+01		2,57E+05	7,04E+03						

Figura 22. Base de datos para el caso de T=200 y S=5e-4.

De otra parte con estos datos, es posible seguir la metodología interpretativa del bombeo a caudal crítico, para lo cual se puede trazar el gráfico de la figura 23, en el que se representa el inverso del caudal 1/Q con relación al tiempo t.

El caudal medio ponderado que suele usarse para obtener T en la recuperación, viene dado por.

$$Q_m = \frac{Q_1.t_1 + Q_2.t_2 + \dots + Q_n.t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

La transmisividad en recuperación viene dada (igual que en descenso) por:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

En la simulación, la T es conocida y Δd se puede medir en el gráfico 23. Se puede obtener el valor de Q.

Dado que Q es coincidente con Qm se deduce que en el caso de recuperación en el pozo después de bombeos a caudal crítico variable puede utilizarse el caudal medio ponderado para introducir en la fórmula de cálculo de la T.

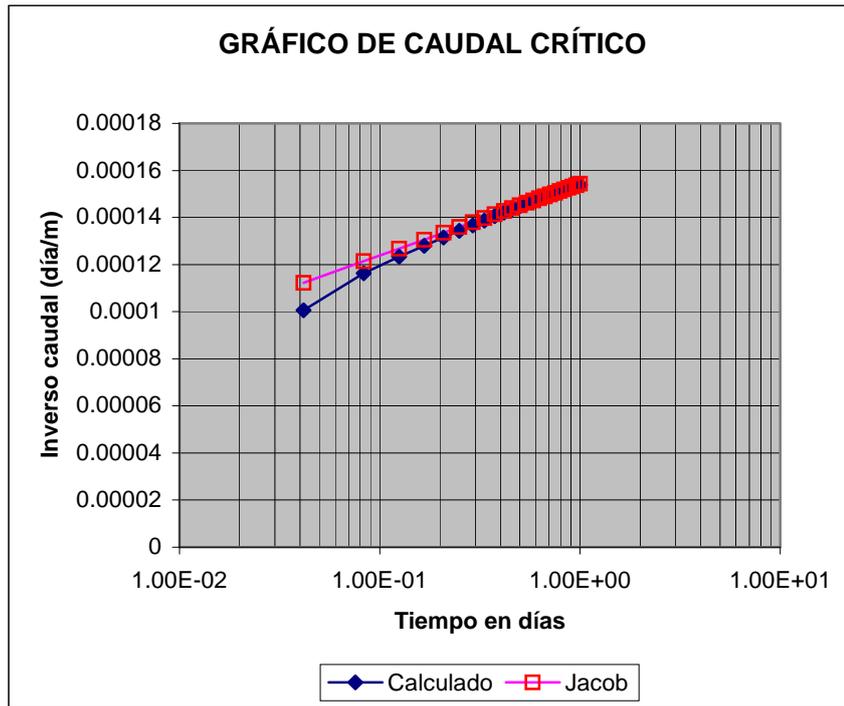


Figura 23 .Gráfico. Inversa del caudal en Bombeo a caudal critico

## 7. CONCLUSIONES.

Mediante el análisis de recuperación en piezómetro después de bombeos a caudal constante, es posible la obtención de los valores de T y S del acuífero haciendo uso de los métodos numéricos de simulación y en el caso concreto de esta investigación de la célula diseñada dentro del modelo Modflow.

Igualmente y haciendo uso de la misma célula, es posible la obtención de la T haciendo uso de los datos de recuperación en pozo después de bombeos a caudal crítico. La utilización del caudal medio ponderado como caudal de bombeo a introducir en la fórmula de cálculo de la T, se ha demostrado que es válida aún a pesar de las fuertes variaciones de caudal en el caso de los bombeos a caudal crítico.

El método operativo a seguir para obtener los parámetros hidrogeológicos de T y S a partir de los datos de campo obtenidos en la recuperación en el piezómetro después de un bombeo a caudal constante, es la que sigue:

Volcar los datos de campo obtenidos en el piezómetro en la base de datos.

Dibujar la curva y cotejarlas con las simuladas por el modelo.

Se va cotejando la curva de campo hasta que finalmente se encuentra la curva de difusividad a la que pertenece la curva de campo.

Una vez obtenido el valor de la difusividad y sabiendo que este debe permanecer constante, se tantea valores de T y S para ajustar la curva simulada a la obtenida en el ensayo de campo de esta forma se ha obtenido los valores de T y S del medio poco permeable estudiado.

No conocían en la literatura científica métodos analíticos que resolvieran el caso de obtener los valores de T y S analizando las recuperaciones en piezómetros con bombeos a caudal constante. Eran muy conocidas y utilizadas con la recuperación en el pozo, pero no en piezómetros, por ello este método aporta, aparte de una comprobación en el cálculo de T, el cálculo de la S. Se entiende que en esta investigación se hace una propuesta metodológica nueva para la resolución de este caso de ensayo de bombeo principalmente aplicado a medios de baja permeabilidad, cuyo nivel de éxito y utilidad se podrá definir a medida que se pruebe en campo dicho método.

En los estudios, con bombeos a caudal crítico, puede interpretarse la recuperación en el pozo haciendo uso del caudal medio ponderado

Se entiende que queda abierta una línea de investigación para la interpretación de ensayos de bombeo por métodos numérico-interpretativos, ampliando así la rica gama existente de métodos analítico-interpretativos.

## BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA

ARLEN W HARBAUGH, EDWARD R. BANTA, MARY C. HILL, AND MICHAEL G. MACDONALD. Moddflow-2000, The U.S. Geological survey modular ground – water model – User guide to modularization concepts and the ground-water flow process, US. Geological Survey Open File Report 00-92.

CUSTODIO, E. y LLAMAS, M. R. 1976. Hidrología Subterránea. Editorial Omega. 2359 páginas.

DAVIS, S. N. y R. J. M. DE WELLS. 1966. Hydrogeology. Versión en castellano: Hidrogeología, Ediciones Ariel, Barcelona, 1971. 563 pp.

GONZALEZ DE VALLEJO LUIS I. Ingeniería Geológica, Ed. Prentice Hall, Capítulo 5 Hidrogeología, Alfredo Iglesias.

HANTUSH, M.S. 1964. Hydraulics of Wells. In: V.T. Chow (ed.), advances in Hydroscience I; 281-432. Academic Press, New York, London.

IGLESIAS LOPEZ, A. 2006. Apuntes del curso de hidrodinámica subterránea y su aplicabilidad en los estudios de almacenamiento de CO<sub>2</sub> en formaciones geológicas. IGME, formación continua. Alfredo Iglesias. Abril de 2006

IGLESIAS LOPEZ, A. 1976. Informe - resumen sobre los ensayos de bombeo realizados por el Instituto Geológico y Mineo de España en Baleares. Informe interno IGME. 133 ensayos en Mallorca, 64 ensayos en Ibiza, 42 en Menorca.

IGLESIAS LOPEZ, A. 1977. Métodos teórico - prácticos para la realización de ensayos de bombeo. Apuntes del Curso de Hidrogeología "Noel Llopis".

IGLESIAS LOPEZ, A. 1986. La interpretación de los ensayos de bombeo en los pozos del terciario detrítico de Madrid. Jornadas sobre la explotación de las Aguas Subterráneas en la Comunidad de Madrid. (Ponencia) PIAM nº 12. Comunidad de Madrid. Canal de Isabel II. Páginas. 185-207.

IGLESIAS LOPEZ, A y VILLANUEVA M. M. 1988. Diseño de un método para la selección de rejillas y macizos de gravas. Boletín Geológico y Minero. T. XCIX-I. Páginas 120-124.

JACOB, C.E. 1940. On the flow of water in an elastic artesian aquifer. Am. Geophys. Union Trans. 72:574-586, parte II.

JACOB, C.E. y S.W. LOHMAN. 1952. Non-steady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. Am. Geophys. Union Trans. 33:559-569.

LOPEZ-CAMACHO, B. y LOPEZ GARCIA, J. 1976. Métodos de ordenador para la evaluación de recursos hidráulicos subterráneos. Servicio Geológico, MOPU. Boletín 141, 127 pp. Es traducción de "Selected Digital Computer Techniques for Groundwater Resource Evaluation" de PRICKETT, T.A. y LOONQUIST, C.G. Illinois State Water Survey. 1971.

PEREZ FRANCO, D. 1982. Hidráulica Subterránea. Ed. Científico Técnica. Ciudad La Habana. 424 páginas.

PRICKETT, T.A. y LOONQUIST, C. G. 1971. Selected digital computer techniques for ground-water resources evaluation. Illinois State Water survey Bull. 55. Urbana, 1971, 62 páginas.

THEIS, C.V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Am. Geophys. Union. Vol.16, páginas 519-524.

TRESCOOTT, P.C., PINDER, G. F. y LARSON, S.P. 1976. Finite-Difference Model for Aquifer Simulation in Two Dimensions with Results of Numerical Experiments. (U.S. Geol. Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 7, Chapter C1.), 116 páginas.

TRESCOOTT, P.C. y LARSON S.P. 1977. Solution to Three-Dimensional Groundwater Flow Equations Using the Strongly Implicit Procedure. Journal of Hydrology, 35: 49-60.

VILLANUEVA MARTINEZ, M. e IGLESIAS LOPEZ, A. 1984. Pozos y Acuíferos Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. ITGE. 426 páginas.

THIEM, G. 1906. Hydrologische Methoden. Gebhardt, Leipzig, 56 p.

WANG H.F & ANDERSON, M.P. Introduction to Groundwater Modeling, Freeman, San Francisco, 237pp, 1982.

WEN-NSING, W OLFANG KI NZELBACH. Processing Modflow. A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution. Diciembre 1998.

