

Tema 4.

EVALUACIÓN DE POZOS

ÍNDICE

	Pags.
4.1. INTRODUCCIÓN 1	
4.2. PREPARACIÓN DE LAS PRUEBAS DE INTERFERENCIA	1
4.2.1. Estudios preliminares 1	
<u>4.2.1.1. Elección del lugar del ensayo</u>	2
<u>4.2.1.2. Características del pozo</u> 2	
<u>4.2.1.3. Colocación y características de los piezómetros y pocillos de observación</u>	4
4.2.2. Realización de las pruebas	6
4.3. ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO	7
4.3.1. Métodos de análisis en régimen permanente	7
<u>4.3.1.1. Acuíferos libres</u> 7	
<u>4.3.1.2. Acuíferos confinados</u> 8	
4.3.2. Métodos de análisis en régimen variable	8
<u>4.3.2.1. Pruebas de interferencia</u> 8	
<u>4.3.2.2. Pruebas de abatimiento y recuperación</u> 11	
<u>4.3.2.3. Pruebas relación reductora. Selección de equipos de bombeo</u>	12
4.4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
4.5. LISTA DE SÍMBOLOS UTILIZADOS	16

Tema 4. EVALUACIÓN DE POZOS

4.1. INTRODUCCIÓN

Los ensayos de bombeo se realizan con dos objetivos principales. Uno de ellos es determinar las propiedades hidráulicas de los acuíferos y se les denomina pruebas de interferencia ya que lo estudiado, más que la bomba o el pozo, es el acuífero. Cuando se planifican correctamente y se llevan a cabo de forma cuidadosa, proporcionan la información básica para solucionar la mayoría de las situaciones relacionadas con el movimiento del agua en el suelo. El otro de los objetivos, es determinar el caudal específico Q/ξ_p , relación entre el caudal alumbrado y el abatimiento dinámico en el pozo. Esta relación es indicativa del rendimiento del pozo. Se utiliza en la selección de la bomba y en el estudio del coste de bombeo. A este tipo de ensayo se le denomina pruebas o aforos, ya que estudia, más que el acuífero, el pozo.

En una prueba de interferencia se perfora un pozo, en la zona del acuífero a estudiar, y se bombea un caudal dado durante un tiempo. En el pozo y en algunos piezómetros próximos a él, se mide el efecto del bombeo en el nivel del agua. Las propiedades hidráulicas del acuífero, T y $(o) S$, se determinan sustituyendo, en las expresiones citadas en apartados anteriores, los valores del abatimiento medido en los piezómetros, las distancias de éstos al pozo y el caudal de bombeo. Los costes elevados de este tipo de pruebas y los limitados recursos económicos disponibles para realizarlas limitan el número de piezómetros empleados.

El procedimiento de un aforo es más simple que el anterior ya que solo se mide el caudal y el abatimiento en el pozo. Aunque su fin es determinar la capacidad productiva de un pozo, en algunas ocasiones se utiliza para estimar las propiedades hidráulicas del acuífero, a veces con un error apreciable.

4.2. PREPARACIÓN DE LAS PRUEBAS DE INTERFERENCIA

4.2.1. Estudios preliminares

El número de pruebas a realizar, su localización y la organización general de las mismas depende del problema planteado, de la información solicitada y de los recursos económicos disponibles. El problema puede ser de ámbito local: predecir el descenso del nivel freático si se perforan nuevos pozos para uso doméstico o tener un ámbito más amplio: estimar la cantidad de agua que puede extraerse de una cuenca hidrográfica o conocer la filtración de agua hacia una zona pantanosa.

Antes de ejecutar las pruebas se debe reunir la información de las condiciones hidrogeológicas del acuífero: características litológicas, espesor y sus límites. Es importante conocer las características y espesor de las capas que están por encima y por debajo del acuífero.

La mayoría de las expresiones utilizadas en el estudio de los acuíferos suponen que dicho acuífero es extensivo. Aunque tales acuíferos no existen, muchos de ellos tienen una extensión horizontal, que desde el punto de vista práctico, puede considerarse extensivo. Sin embargo, otros tienen una extensión horizontal limitada, pues quedan limitados por un material impermeable. Tales barreras hidrogeológicas pueden ser los lados impermeables rocosos de un valle enterrado, una falla o simplemente cambios en la litología del material del acuífero. Se debe identificar los límites de recarga del acuífero, que se corresponden con zonas en las cuales no se produce descenso del nivel del agua durante el bombeo, por ejemplo, cuando el acuífero entra en contacto con un río, canal ó lago.

Se debe tener en cuenta la proximidad de una barrera hidrogeológica o de un límite de recarga en el análisis de las medidas de las pruebas de interferencia. Además de la posición y de la naturaleza de dichos límites es necesario conocer la dirección del movimiento del agua en el suelo. En ocasiones, las barreras impermeables están ocultas y son detectadas en el transcurso de la prueba.

Con frecuencia, la información necesaria se conoce antes de realizar las pruebas. Por el contrario, hay situaciones donde ésta es escasa. El conocimiento de las características hidrogeológicas de la zona ayuda a decidir sobre: el tipo de perforación a realizar, el equipo requerido así como el número y el lugar de las pruebas.

Los pozos ya existentes en la zona suelen utilizarse en las pruebas, reduciendo así su coste total. Sin embargo, se debe conocer, su profundidad, diámetro, los detalles de la perforación y el uso de los mismos.

4.2.1.1. Elección del lugar del ensayo

En ocasiones, el lugar está ya determinado por la existencia de pozos anteriores pero cuando no es así, deberemos tener en cuenta lo siguiente:

- las características hidrológicas del sitio elegido deben de ser representativas de la zona.
- las variaciones del nivel freático, o piezométrico, deben ser pequeñas.
- el lugar de la prueba no debe elegirse en las proximidades de barreras hidrogeológicas o límites de recarga.
- el agua extraída del bombeo debe de ser descargada lejos del pozo para evitar que se infiltre y recargue el acuífero.

Si alguna de estas condiciones no se cumple, existen técnicas que corrigen las desviaciones producidas para el análisis de las medidas realizadas.

4.2.1.2. Características del pozo

Una vez elegido el lugar del ensayo se perfora el pozo. Las muestras de suelo extraídas en la perforación definen el registro del perfil y son un elemento fundamental para decidir sobre la conveniencia de instalación de un entubado protector, así como la colocación de una rejilla.

La profundidad del pozo se determina a partir del registro del pozo, o a partir de los registros de pozos próximos situados en el mismo acuífero. Se debe de perforar hasta el lecho del acuífero pues se utilizará un mayor espesor del mismo como zona de entrada. Se obtiene así, un descenso mayor del nivel del agua y un rendimiento más alto. Aunque existen pozos con profundidades que varían entre unos pocos metros hasta más de 3000 m, lo normal es que no superen los 500 m.

El diámetro de la perforación oscila entre 0,10 y 0,30 m. Su valor será lo suficientemente grande para alojar el grupo de bombeo y para permitir la entrada del agua sin excesiva pérdida de carga. A igualdad de otras variables, el aumento del diámetro significa un pequeño aumento del caudal extraído, ver ecs. (3.32') y (3.36), sin embargo, la pérdida de carga de entrada hf_e se reduce notablemente. El diámetro del tubo puede ser el mismo en toda la longitud del pozo o puede reducirse configurándose como una tubería telescópica. Dicha tubería suele ser metálica, aunque también se utilizan otros materiales como amianto-cemento, fibra de vidrio, etc. El espesor de su pared queda determinado para resistir los esfuerzos más desfavorables a los que está sometida debido a empujes del terreno y, sobre todo, a empujes hidrostáticos producidos por la diferencia de nivel piezométrico entre el exterior y el interior del pozo.

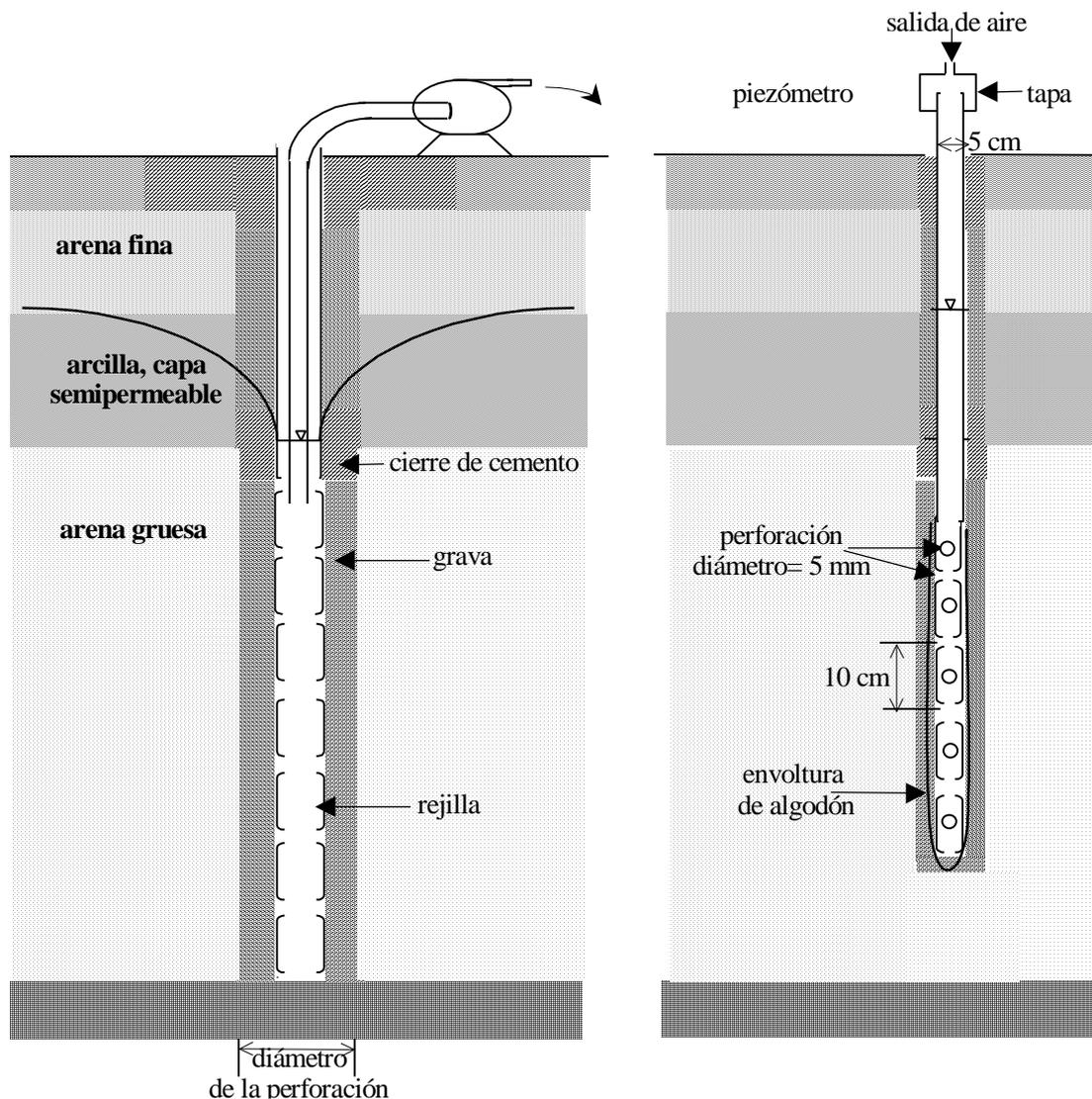


Figura 4.1. Esquema con detalles de la perforación de un pozo, que penetra totalmente un acuífero semiconfinado y de piezómetro.

En el caso de un acuífero en roca consolidada, el pozo no necesita ser entubado. El caudal alumbrado dependerá del tamaño, número y continuidad de las aberturas de la roca de la zona perforada.

La colocación de una rejilla en la zona de entrada del agua disminuye su velocidad, soporta al material suelto y evita la entrada de arena. La longitud de la rejilla se estima en función del espesor, estratificación del acuífero y del descenso del nivel de agua requerido. Una regla práctica de diseño, en el caso de acuíferos confinados y homogéneos, es colocar la rejilla de longitud, igual o superior, al 70-80% de su espesor. En esta situación la entrada del agua al pozo se considera horizontal y se consigue, al menos, un 90% del rendimiento máximo del que se obtendría al perforar totalmente el acuífero. En acuíferos libres y homogéneos se aconseja poner la rejilla en la mitad o tercio inferior del mismo. Cuando el acuífero es heterogéneo, tanto libres como confinados, la rejilla se coloca en el estrato más permeable. Para prevenir el descenso del agua en el pozo desde las capas situadas encima de la rejilla, esta zona se sella con material arcilloso, cemento etc. (ver figura 4.1).

En acuíferos de gran espesor se coloca la rejilla en la parte superior, por ejemplo los primeros 50 m, pues el coste económico resultaría prohibitivo si se colocase la rejilla en todo el espesor. Si la rejilla ocupa menos del 70 % del espesor del acuífero, el pozo penetra parcialmente el acuífero y el movimiento del agua a la entrada del pozo deja de ser horizontal. Se debe de considerar se considera que la entrada del agua al pozo es horizontal. Se debe de considerar la componente vertical de la velocidad en un área desde el centro del pozo hasta una distancia, aproximada, al espesor del acuífero. Lo mismo ocurre con la conductividad hidráulica: la componente que le corresponde al movimiento horizontal es mayor que la que le corresponde al movimiento vertical por lo que, en éste último, se produce mayor pérdida de

carga. El nivel del agua medido en piezómetros, o pocillos de observación, colocados en esa área debe ser corregido antes de determinar las propiedades del acuífero.

El diámetro de la rejilla se calcula, con un criterio de velocidad, a partir del caudal de bombeo. En la práctica, se recomienda una velocidad de entrada del agua de, aproximadamente, a 0,03 m/s pues la pérdida de carga producida al atravesar el agua los orificios de la rejilla se considera despreciable. El tamaño de los orificios depende del de la arena del acuífero. Por consiguiente, las características naturales del acuífero fijan tanto la longitud de la rejilla como el tamaño de sus orificios por lo que, el diámetro queda como un factor que puede variarse. Se elegirá un valor tan grande como sea posible para no sobrepasar el límite de velocidad prefijado. La distribución de orificios en la rejilla no debe de provocar una convergencia excesiva de las líneas de corriente hacia ellos, lo que aumentaría el abatimiento (consultar más detalles en Johson, 1966).

La bomba y la unidad motriz empleadas en las pruebas, deben de ser capaces de trabajar de forma continua, a caudal constante, un periodo de tiempo de al menos dos días. Éste podría ser mayor, en el caso de acuíferos libres y en el caso de medir el nivel del agua en piezómetros situados a grandes distancias del pozo de bombeo. Interesa que su campo de funcionamiento, en cuanto a caudales y alturas de elevación, sea amplio. Se necesita un equipo robusto que resista los frecuentes traslados y montajes a que son sometidos.

El agua extraída del pozo no debe de retornar al acuífero para lo cual se suelen utilizar tuberías que la conducen a distancias de, aproximadamente, 100 o 200 m, del pozo y la descargan a un depósito, canal o cauce natural no conectado con el acuífero en estudio.

Se facilita la entrada de agua en el pozo aumentando la permeabilidad en sus proximidades mediante el llamado desarrollo del pozo. Esta operación consiste en extraer los elementos finos que rodean la rejilla y rellenar el hueco dejado con materiales más gruesos de mayor permeabilidad. Los filtros de grava aumentan la permeabilidad y retienen el material fino del acuífero, que de otra manera entraría en el pozo. Su espesor varía entre los 8 y 15 cm. La composición del filtro de grava debe de ser de un material grueso, liso, redondeado y uniformemente clasificado, (consultar más detalles en Johson, 1966).

4.2.1.3. Colocación y características de los piezómetros y pocillos de observación

Los piezómetros son perforaciones de pequeño diámetro, aproximadamente 5 cm, revestidas con un tubo protector, que se practican en la proximidad del pozo de bombeo (ver figura 4.1). El agua entra por su extremo inferior que puede obstruirse con el material del acuífero suspendido en el agua. Para evitarlo, se coloca una rejilla en los 30 a 50 cm finales. Tanto la rejilla como el extremo inferior del piezómetro suele recubrirse con un material de algodón ó yute que evite su taponamiento. Suele colocarse una capa fina de arena gruesa o grava uniforme para facilitar la entrada del agua. Al tener diámetro pequeño la respuesta a las variaciones del nivel de agua es rápida.

Los pocillos de observación, a diferencia de los anteriores, son perforaciones con su extremo inferior cerrado (ver figura 4.2). Si el medio poroso no tiene cohesión se coloca un entubado protector perforado en su parte inferior con una longitud igual a la distancia en la que se prevé fluctúe el nivel freático. El espacio entre la perforación y el entubado se rellena con grava hasta una distancia, algo superior, al comienzo de las aberturas lo que previene su obturación y facilita el movimiento del agua en el pocillo.

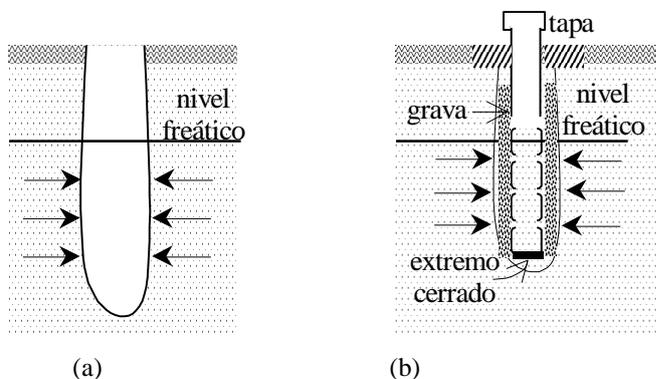


Figura 4.2. Pocillos de observación: (a) sin entubado y (b) con entubado y filtro de grava.

El número de piezómetros o pocillos a instalar depende de la información y del grado de precisión requeridos y sobre todo del presupuesto asignado. Se recomienda un número mínimo de tres. Las disposiciones más frecuentes de los mismos se indica en la figura (4.3).

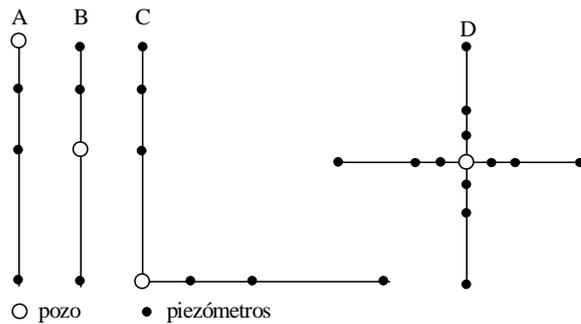


Figura 4.3. Diferentes disposiciones de piezómetros en un ensayo de acuífero.

Las disposiciones A, B y C son las más apropiadas en los estudios de problemas de avenamiento.

La colocación de los piezómetros dependerá de:

- El tipo de acuífero: en acuíferos confinados la formación del cono de depresión se propaga rápidamente y puede ser medida a grandes distancias. En cambio, en acuíferos libres su propagación es más lenta y, a no ser que, el bombeo se prolongue varios días, las medidas se realizan a distancias que no superan los 100 m.
- Conductividad hidráulica del acuífero: si el valor de K es muy grande el cono de depresión es amplio y plano en caso contrario, es más profundo y menos extenso por lo que los piezómetros se colocan a distancias más cortas.
- caudal bombeado: a mayor caudal de bombeo, mayor cono de depresión y mayor es la distancia de los piezómetros.
- Longitud de la rejilla del pozo: el flujo en las proximidades de pozos que perforan parcialmente el acuífero no es horizontal, lo que produce un descenso del potencial hidráulico más acusado en las cercanías del pozo. En consecuencia, las medidas de los pocillos colocados en esa zona son poco precisas y su distancia al pozo será mayor que en pozos que perforan totalmente el acuífero.
- Estratificación del perfil del suelo: el valor de conductividad hidráulica en dirección horizontal es distinto al de la dirección vertical que produce descensos en el nivel del agua del piezómetro diferentes según la profundidad a la que estén colocados. Sus diferencias disminuyen con el tiempo del bombeo. Cuanto mayor sea la distancia al pozo menor será el efecto de la estratificación.

Aunque no se puede dar una regla fija, se obtienen buenos resultados instalando los piezómetros a distancias entre 10 y 100 m del pozo.

En acuíferos homogéneos e isótropos, la profundidad a la que se colocan los piezómetros y pocillos de observación, suele coincidir con el punto medio de la rejilla del pozo. En acuíferos estratificados, con capas de arcilla intercaladas, se recomienda instalarlos por encima y por debajo de estas capas para comprobar si existe conexión entre las capas de arena. Cuando el movimiento de agua es horizontal, las superficies equipotenciales son verticales y el nivel piezométrico medido en los piezómetros es único, independiente de la profundidad a la que se coloquen.

4.2.2. Realización de las pruebas

En las pruebas de interferencia se mide el tiempo, el caudal y el nivel piezométrico. Los sistemas de medida y la toma de datos se describen de forma más detallada, de lo que se expone a continuación, en Johnson (1966) y Kruseman y Ridder (1990).

Dado que el descenso del nivel freático (o piezométrico) es más acusado durante la primera y segunda hora de bombeo, las medidas del nivel del agua se realizan con mayor frecuencia que en las horas siguientes. En éstas, el cono de depresión aumenta de forma más lenta y las medidas se espacian de forma gradual.

Antes de comenzar el bombeo se mide el nivel de agua en todos los piezómetros. Dichas medidas se toman como nivel de referencia. Las medidas suelen realizarse de forma manual automatizada con su almacenamiento en un registrador de datos. Entre los métodos primeros más utilizados está el de la cinta métrica de acero humedecida y la cinta métrica con sensor eléctrico y entre los segundos, el transductor de presiones.

El caudal de la prueba suele determinarse unos días antes de que ésta se realice. Se mantiene el bombeo durante unas pocas horas: el mayor descenso del nivel del agua en el pozo tiene lugar en las primeras horas de funcionamiento. Estas pruebas preliminares sirven para conocer el abatimiento dinámico del pozo máximo que le corresponde al caudal extraído. Aparte proporcionan información sobre la variación en el nivel del agua de todos los piezómetros. Para obtener medidas más precisas, se recomienda elegir un caudal que produzca una variación de, al menos, unos decímetros.

En las pruebas de interferencia el caudal debe ser constante. Se mide, al menos, cada hora y si es necesario, se ajusta al valor deseado. La medida del caudal suele hacerse con: un medidor de orificio, un medidor de caudal ó cualquier aforador de corrientes libres, en el caso de que el agua del pozo desagüe a un canal.

La duración de las pruebas depende del tipo de acuífero a evaluar y del grado de precisión requerido. Debe de tenerse en cuenta que el coste adicional, de unas pocas horas más de funcionamiento de la bomba, es bajo comparado con el coste total de la prueba. En general, la condición de régimen permanente se alcanza pocas veces, por lo que el bombeo se continúa hasta que el nivel del agua en los piezómetros se estabiliza es decir, se alcanza el régimen (casi) permanente (ver figura 4.4).

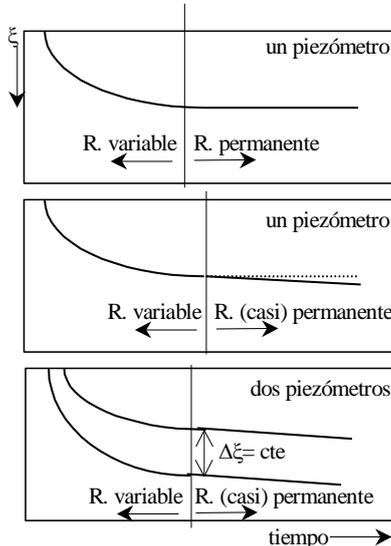


Figura 4.4. Interpretación de la variación del abatimiento en el tiempo en las pruebas de interferencia.

La condición de régimen permanente se produce a las 15 a 20 h de funcionamiento en acuíferos confinados, mientras que en acuíferos libres puede ser de varios días.

4.3. ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO

Todos los métodos de análisis expuestos en los siguientes apartados se basan en los supuestos del apartado 3.4. del tema hidráulica de pozos. Si alguno de estos no se cumpliera, se debe de utilizar otros métodos que pueden consultarse en Krusseman y Ridder (1994) y Batu (1998).

4.3.1. Métodos de análisis en régimen permanente

4.3.1.1. Acuíferos libres

A partir de la ecuación de Dupuit-Forchmeir (3.32) se obtiene:

$$K = \frac{Q}{\pi} \frac{\text{Ln}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{h_2^2 - h_1^2} \quad [4.1]$$

donde h_1 y h_2 son las medidas realizadas en los piezómetros de observación situados a las distancias del pozo r_1 y r_2 , respectivamente.

Supuesto un acuífero de gran espesor y con descenso del nivel freático pequeño se cumple: $H+h_r \approx 2H$ (ver figura 3.3 a) y sustituido en la ecuación anterior, transformando los logaritmos neperianos a decimales, se llega a:

$$T = \frac{2,303Q}{2\pi} \frac{\log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{(\xi_2 - \xi_1)} \quad [4.1']$$

donde ξ_1 y ξ_2 son los abatimientos de los lugares donde se colocan los piezómetros.

Si el acuífero es de pequeño espesor el abatimiento producido puede representar un porcentaje alto respecto del espesor del acuífero y ξ debe de ser corregido según se vió en la ec. (4.34): $\xi' = \xi - \xi^2 / (2H)$.

4.3.1.2. Acuíferos confinados

A partir de la ec. de Thiem (3.36') se obtiene:

$$T = \frac{Q}{2\pi} \frac{\text{Ln}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{h_2 - h_1} = \frac{2,303Q}{2\pi} \frac{\log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\xi_1 - \xi_2}$$

[4.2]

4.3.2. Métodos de análisis en régimen variable

4.3.2.1. Pruebas de interferencia

Como ya se indicó en el apartado 4.2 con estas pruebas se determina la interferencia producida en una o varias perforaciones situadas dentro de la zona de influencia del pozo de bombeo para calcular los parámetros T y S (o V) del acuífero.

Se parte de la ecuación de Theis (3.44) expresada por:

$$\xi = \left(\frac{Q}{4\pi T} \right) W(u)$$

[4.3]

y del valor de u , ec. (3.45), expresado como:

$$\frac{t}{r^2} = \left(\frac{S}{4T} \right) \frac{1}{u}$$

[4.4]

Método de la curva tipo

Aplicando logaritmos decimales a la ec. (3.57) queda:

$$\log(\xi) = \log\left(\frac{Q}{4\pi T}\right) + \log(W(u))$$

[4.5]

De forma análoga con la ec. (3.58) se llega a:

$$\log\left(\frac{t}{r^2}\right) = \log\left(\frac{S}{4T}\right) + \log\left(\frac{1}{u}\right)$$

[4.6]

Dado que Q es constante, el primer sumando del segundo miembro de las ecs. (4.5) y (4.6) es constante. Por lo tanto $W(u)$ se relaciona con u de forma semejante a la relación entre ξ y t/r^2 .

Al representar en un gráfico de coordenadas logarítmicas, a la misma escala que los de la curva tipo de Theis (ver figura 4.5), los valores medidos de ξ en función de t/r^2 , las dos curvas deberían ser similares. Se superpone los dos gráficos, manteniendo los ejes coordenados paralelos, hasta conseguir el mejor ajuste entre los datos medidos y los de la curva tipo.

Un procedimiento alternativo consiste en representar los valores de $W(u)$ con respecto a $1/u$. En este caso los valores medidos se representarán ξ en función de t/r^2 .

Curva tipo de Theis

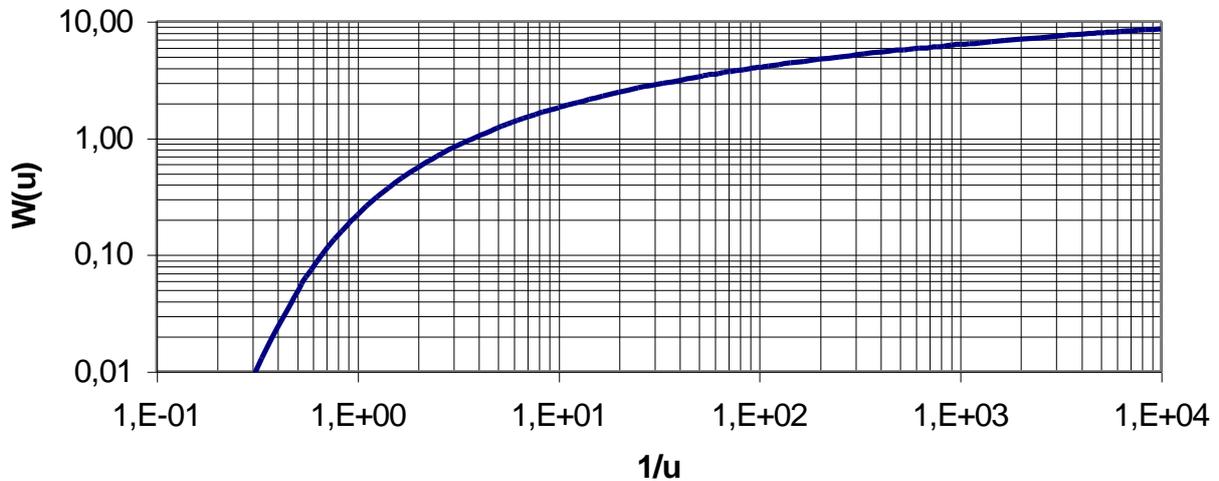


Figura 4.5. Curva tipo de Theis.

Posteriormente, se elige un valor arbitrario, no tiene porque elegirse un punto coincidente con el solapamiento entre las dos curvas, y se leen sus coordenadas $1/u$, $W(u)$, ξ y t/r^2 . Estos valores se introducen en las expresiones (4.3) y (4.4) y se calculan los parámetros T y S .

Como al principio del bombeo el caudal es variable, las primeras medidas pueden que no se ajusten bien a los de la curva tipo. Conforme el tiempo aumenta su efecto se minimiza y mejora el ajuste entre los datos teóricos y las medidas. Este método da muy buenos resultados si las medidas, al representarlas en coordenadas logarítmicas, muestran una curvatura definida dentro del rango $u < 0,01$ ó $1/u < 100$.

En el caso de acuíferos libres de pequeño espesor los valores de abatimiento deben ser corregidos ($\xi = \xi - \xi^2 / (2H)$) según se vio en 3.4.1.1.

Aproximación de Jacob

Se parte de la aproximación de Jacob ec. (3.47) expresada por:

$$\xi \approx \frac{2,303Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2,25Tt}{r^2 S}\right) \quad [4.7]$$

La expresión anterior es asintótica. Predice el abatimiento, con gran precisión, cuando ha transcurrido un tiempo suficiente desde el comienzo del bombeo.

Al ser Q , T y S constantes, la ec. (4.7) puede expresarse por:

$$\xi = \frac{2,303Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2,25T}{r^2 S}\right) + \frac{2,303Q}{4\pi T} \log(t) \quad [4.8]$$

Al representar los valores de ξ en función de $\log(t)$, según la ecuación anterior, se obtiene una línea recta con pendiente $2,303 Q / (4 \pi T)$ que intercepta al eje de abscisas en las coordenadas $\xi = 0$ y $t = t_0$. Introduciendo estos valores en (4.7) se llega a:

$$0 = \frac{2,303Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2,25T t_0}{r^2 S}\right)$$

[4.9]

Se cumple:

$$\log\left(\frac{2,25T t_0}{r^2 S}\right) = 0; \quad \frac{2,25T t_0}{r^2 S} = 1; \quad S = \frac{2,25T t_0}{r^2}$$

[4.10]

Dada una relación de tiempos $t/t_0 = 10$, $\log(t/t_0) = 1$, se sustituye el valor de ξ por el de $\Delta\xi$ (representaría la variación del abatimiento por ciclo logarítmico de tiempo) en la ec. (2.62) y se llega a:

$$T = \frac{2,303Q}{4\pi \Delta\xi}$$

[4.11]

Existen tres procedimientos para calcular T y S a partir de las ecs. (4.10) y (4.11).

Procedimiento 1.

- Representar las medidas ξ de los piezómetros en relación con $\log(t)$ y ajustar una línea recta.
- Calcular el valor de t_0 alargando la recta hasta que corte al eje de abscisas ($\xi = 0$).
- Determinar la pendiente de la recta es decir, el $\Delta\xi$ por ciclo logarítmico de tiempo.
- Introducir los valores de Q , $\Delta\xi$ en (4.1).
- Introducir los valores de T , t_0 y r en la ec. (4.10) y calcular S .
- Comprobar si se cumple la condición $u < 0,01$.

El procedimiento se repite con las medidas de cada piezómetro. Los parámetros T y S calculados en cada uno de ellos deberían de ser similares.

Procedimiento 2.

La ec. (4.7) puede expresarse por:

$$\xi = \frac{2,303Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2,25T t}{S}\right) - \frac{2,303Q}{2\pi T} \log(r)$$

[4.7']

Se representan las medidas del abatimiento, tomadas al mismo tiempo en todos los piezómetros, en función de $\log(r)$ y se siguen los mismos pasos que en el procedimiento anterior. En este caso se toma un ciclo logarítmico de distancia, $r_2/r_1 = 10$ y $\log(r_2/r_1) = 1$ y se obtiene la ec. (4.11) y la expresión siguiente:

$$S = \frac{2,25T t_0}{r_0^2}$$

[4.12]

Si las medidas del abatimiento no se realizaron al mismo tiempo en todos los piezómetros debería de utilizarse el procedimiento 1.

Procedimiento 3.

La ec. (4.7) puede ponerse como:

$$\xi = \frac{2,303Q}{4\pi T} \left[\log\left(\frac{2,25T}{S}\right) + \log\left(\frac{t}{r^2}\right) \right]$$

[4.7"]

En este caso se representan las medidas del abatimiento de todos los piezómetros en función de $\log(t/r^2)$. Al seguir los mismos pasos que en los procedimientos anteriores, aquí tomando un ciclo logarítmico de (t/r^2) , $(r_2/t_2)/(r_1/t_1)=10$ y $\log((r_2/t_2)/(r_1/t_1))=1$, se obtiene la ec. (4.11) y la expresión siguiente:

$$S = 2,25T \left(\frac{t}{r^2} \right)_0$$

[4.12]

4.3.2.2. Pruebas de abatimiento y recuperación

El parámetro T puede ser determinado a partir de las medidas del abatimiento residual, ξ' , en el propio pozo durante el periodo de recuperación. El valor obtenido sirve de comprobación de los valores determinados con las medidas de los piezómetros. Supuesto valores de $u'=r^2 S/(4 T t') < 0,01$ se utiliza la aproximación de Jacob y se llega a la ec. (3.49) que se expresa como:

$$\xi' = \frac{2,303Q}{4\pi T} \log\left(\frac{t}{t'}\right)$$

[4.13]

donde t' es el tiempo transcurrido desde la parada de la bomba.

El procedimiento a seguir es similar a lo expuesto en otros procedimientos anteriores: los valores de ξ' se representan en relación con $\log(t/t')$ y se ajustan a una línea recta. La pendiente de la recta (4.13) viene dada por:

$$\frac{\Delta\xi'}{\Delta\log\left(\frac{t}{t'}\right)} = \frac{2,303Q}{4\pi T}$$

[4.14]

Tomando un ciclo logarítmico de (t/t') , $(t_2/t'_2)/(t_1/t'_1)=10$ y $\log(t_2/t'_2)/(t_1/t'_1)=1$, y despejando T de la ec. (4.14) se obtiene:

$$T = \frac{2,303Q}{4\pi \Delta\xi'}$$

[4.15]

Este método puede utilizarse si no se disponen de medidas realizadas en piezómetros, aunque no determina el parámetro S .

4.3.2.3. Pruebas relación reductora. Selección de equipos de bombeo

Introducción

Las expresiones, que relacionan el caudal con el abatimiento dinámico en los diferentes tipos de acuíferos, expuestas en apartados anteriores no consideran la pérdida de carga de entrada del agua en el pozo hf_e . El abatimiento dinámico en el pozo resulta tanto de la pérdida de carga en régimen laminar del medio poroso ($B Q$) como de la pérdida de carga de entrada del agua en el pozo ($C Q^2$). Se expresa por:

$$\xi_p \cong BQ + CQ^2$$

[4.16]

donde B y C son constantes. A la última se la denomina constante del pozo y caracteriza el desarrollo del pozo, la rejilla, el filtro de grava etc.

También hf_e se estima a partir de expresiones empíricas del tipo $C Q^n$ con $n > 1$. El valor de n debe de calcularse en cada pozo.

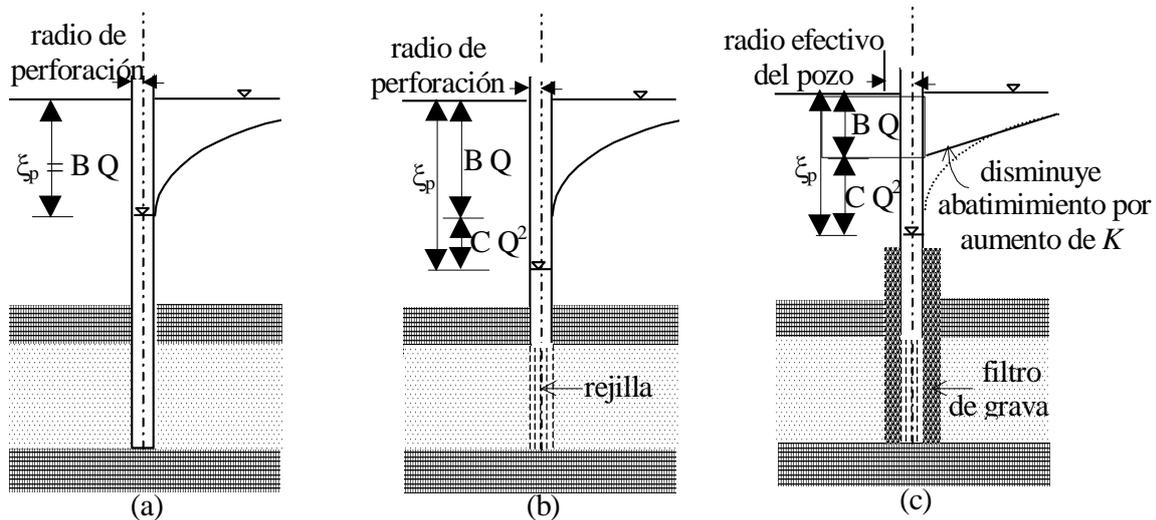


Figura 4.6. Abatimiento en un acuífero confinado: (a) pozo sin entubar; (b) pozo con rejilla y (c) pozo con rejilla y filtro de grava.

El primer sumando de la expresión (4.16) se determina con las expresiones presentadas, para cada tipo de acuífero, en apartados precedentes. El segundo sumando, indica la pérdida de carga de entrada producida al atravesar el agua la rejilla, y en su caso el filtro de grava, y en la entrada del agua a la bomba. El valor de hf_e no se determina bajo el supuesto de régimen laminar, como el primero, pues la velocidad, en las proximidades del pozo, es grande y el régimen de corriente, a la entrada del pozo, es turbulento. Jacob (1947) propuso determinarla a partir de la definición de radio efectivo del pozo, determinado de forma empírica, que representa la distancia, medida desde el eje del pozo, a la que le corresponde el abatimiento dinámico teórico, en régimen permanente, del exterior de la rejilla.

El radio del pozo es difícil determinar pues varía con las características del medio poroso, con el entubado, con las características de la rejilla y con el filtro de grava. En pozos sin entubar o en pozos con rejilla, el valor de r_p coincide con el radio de la perforación (o de la rejilla), ver figuras 4.6 (a) y (b). En pozos entubados o con filtro de grava, se toma como valor r_p el que corresponde al radio efectivo del pozo, ver figura 4.6 (c). Éste puede ser mayor o menor que r_p dependiendo de las características hidráulicas del filtro de grava y de hf_e .

En la figura 4.6 (c) la presencia del filtro de grava aumenta el valor de K en las proximidades del pozo por lo que el abatimiento será menor que en el figura 4.6 (b).

El rendimiento del pozo se expresa en términos de caudal específico Q/ξ_p , relación entre el caudal alumbrado y el abatimiento dinámico del pozo (caudal por unidad de abatimiento dinámico). Se evalúa, generalmente, mediante pruebas llevadas a cabo a caudal constante o, con variación escalonada del mismo. En las primeras, se mide el nivel del agua en el pozo a intervalos de tiempo regulares durante un tiempo de bombeo que suele ser de 8 h. En las segundas, cada caudal se bombea durante 1 h.

Régimen permanente

El caudal específico, sin considerar hf_e , se obtiene a partir de las ecuaciones (3.31) y (3.36):

$$\frac{Q}{\xi_p} = \frac{\pi K(H+h_p)}{\text{Ln}\left(\frac{R}{r_p}\right)}; H+h_p = 2H-\xi_p; \frac{Q}{\xi_p} = \frac{\pi K(2H-\xi_p)}{\text{Ln}\left(\frac{R}{r_p}\right)} \text{ (pozo ordinario)}$$

$$\frac{Q}{\xi_p} = \frac{2\pi T}{\text{Ln}\left(\frac{R}{r_p}\right)} \text{ (pozo artesiano)}$$
[4.17]

El caudal específico de un pozo artesiano es constante pues el valor de $\text{Ln}(R)$ varía poco, mientras que en un pozo libre decrece linealmente, en términos aproximados con el descenso del nivel en el pozo.

Dada hf_e y considerando la ec. (4.16) el caudal específico se expresa por:

$$\frac{Q}{\xi_p} \cong \frac{1}{B+CQ}$$
[4.18]

donde $B = \frac{\text{Ln}\left(\frac{R}{r_p}\right)}{2\pi T}$ en acuíferos confinado (valor obtenido a partir de la ec. (3.36).

Se observa que el caudal específico en un acuífero confinado no es constante, como en el caso anterior, sino que disminuye con el caudal.

Régimen variable

En régimen variable el caudal específico depende del caudal y del tiempo. El valor de BQ en la ec. (4.16) se determina a partir de la ecuación de Theis (ec. (3.44)). Si se acepta la aproximación de Jacob (3.47), la ec. (4.16) puede escribirse como:

$$\xi_p \cong BQ + CQ^2 = \frac{2,303Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2,25\alpha t}{r_p^2}\right) + CQ^2$$
[4.19]

donde $B = \frac{2,303}{4\pi T} \log\left(\frac{2,25\alpha t}{r_p^2}\right)$

El caudal específico se calcula por:

$$\frac{Q}{\xi_p} = \left[\frac{2,303}{4\pi T} \log\left(\frac{2,25\alpha t}{r_p^2}\right) + CQ \right]^{-1}$$
[4.20]

En la expresión anterior se observa que el caudal específico disminuye en el tiempo y con el aumento del caudal. En general, tanto en régimen variable como en permanente, las variaciones de r_p no contribuyen significativamente al abatimiento del pozo, la variación en el valor de B es despreciable. Sin embargo, si pueden afectar, de forma apreciable, a la pérdida de carga de entrada, CQ^2 , dado que la velocidad de entrada del agua al pozo depende del área de la sección de paso que, a su vez, es proporcional a r_p^2 . En general, con caudales pequeños, la pérdida de entrada se deprecia, pero con caudales grandes, o en pozos con entubado defectuoso, su contribución al abatimiento en el pozo puede ser importante.

Análisis de las medidas tomadas en las pruebas con variación escalonada de caudal

En estas pruebas, se mide el caudal y el abatimiento en el pozo y a partir de ellos se calcula los valores de C y radio efectivo del pozo. Para determinar este último, se necesita conocer el valor del S que puede calcularse con las medidas de algún piezómetro cercano al pozo.

La ec. (4.16) se expresa por:

$$\frac{\xi_p}{Q} \cong B + CQ$$

[4.21]

donde ξ_p/Q define el abatimiento específico (abatimiento por unidad de caudal).

La expresión anterior representa una línea recta con pendiente C y con ordenada en el origen B.

La altura de elevación a tener en cuenta en la selección de bombas de explotación, no se corresponde con la máxima depresión posible. El caudal no debe de superar límites que signifiquen velocidades de entrada al pozo excesivamente grandes, ni que lleguen a desaguar una importante proporción del acuífero explotado. El tiempo máximo de bombeo diario ha de depender del caudal, pero debe de tenerse en cuenta, además, las posibles oscilaciones del nivel estático estacional en el pozo.

El concepto de seguridad en el pozo se refiere al equilibrio que ha de existir entre los alumbramientos a que es sometido y la recarga, natural o artificial, de sus reservas: el régimen de explotación puede ser mantenido ilimitadamente sin llegar al agotamiento. No obstante, tendrá lugar un nivel de estiaje mínimo, que sufrirá cierta oscilación de un año para otro y durante el cual, a causa de la distribución de exigencias hídricas de los cultivos (en el caso de pozos para riego), el tiempo de bombeo suele ser máximo. Estas y otras variables inciden en la evolución de los niveles dinámicos y caudal de bombeo durante la campaña de riegos. Los conceptos expuestos deberán ser tenidos en cuenta al interpretar los parámetros obtenidos en los ensayos. En todo caso, el cálculo de la instalación de bombeo se regirá por los principios generales aplicables a sistemas de distribución, haciendo intervenir el abatimiento dinámico del pozo como un sumando esencial en la curva característica de los mismos.

En una instalación de bombeo el nivel del agua en el pozo disminuye en el tiempo por lo que la altura manométrica de elevación de la bomba aumenta. De la curva característica la bomba $H(Q)$, se deduce que Q disminuye en el tiempo. Teniendo en cuenta la curva característica del sistema de distribución $\psi(Q)$ se cumple:

$$H(Q) = \xi(Q) + \psi(Q)$$

[4.22]

4.4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Batu, V. 1998. "Aquifer Hydraulics. A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis" Capítulos 3 y 11. Wiley-Interscience. London.
- Jonhson, E.F. Inc. (Ed.). 1966. "Ground Water and Wells". Capítulos 10, 12 y 14. Publicado por E.F.Jonhson, Inc. Minesota.
- Kruseman, G.P y N.A. de Ridder. 1990. "Analysis and Evaluation of Pumping Tests Data" 2ª ed. ILRI Publication nº 47. Wageningen. (Traducción castellana de la versión de 1973: "Análisis y evaluación de los datos de ensayo por bombeo". ILRI Boletín 11ª, Wageningen, 1975).
- Ritzema, H.P. (Ed.). 1994. "Single-well and aquifer tests. Groundwater investigations" y "Basic of Groundwater flow". En: "Drainage principles and applications", 2ª ed.. ILRI Publication nº 16. Wageningen.
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. 1995. "Ground water manual". A water resources technical publication 2ª ed. Washington D.C.

4.5. LISTA DE SÍMBOLOS UTILIZADOS

	Dimensión
C: constante del pozo,	$L^{-5} T^2$
e: espesor del acuífero,	L
H: nivel freático o piezométrico,	L
h_f : pérdida de carga de entrada al pozo,	L
K: conductividad hidráulica,	$L^3 T^{-1}$
Q: caudal del pozo,	L
R: radio de influencia del pozo,	L
r: distancia al pozo,	L
S: coeficiente de almacenamiento,	-
T: transmisividad del acuífero,	$L^2 T^{-1}$
t: tiempo,	T
u : variable de Boltzman,	-
W(u): función del pozo,	-
V: porosidad efectiva,	-
ξ : abatimiento dinámico,	L
ξ' : abatimiento dinámico corregido y	L
ψ : curva característica.	L

Subíndices:

p : pozo.