

INGENIERÍA HIDRÁULICA

aplicada a los sistemas de distribución de agua

Cabrera E., Espert V., García-Serra J., Martínez F.

VOLUMEN I



INGENIERÍA HIDRÁULICA

aplicada a los sistemas de distribución de agua

Volumen I

INGENIERÍA HIDRÁULICA

aplicada a los sistemas de distribución de agua

Volumen I

Editores:

Cabrera, E., Espert, V., García Serra, J., Martínez, F.

- © **Universidad Politécnica de Valencia**
- © **Los editores, 2009, por esta edición**

Reservados todos los derechos.

La reproducción de cualquier parte de este libro sin el permiso de los propietarios del copyright es ilegal. Los permisos deben ser solicitados a cualquiera de los editores.

Editores

Cabrera E., Espert V., García-Serra J., y Martínez F.

Elaboración y edición

ITA-Universidad Politécnica de Valencia

Impresión y encuadernación

Martín impresores

3ª Edición 2009

ISBN 978-84-613-3949-5 Tomo I

ISBN 978-84-613-3950-1 Tomo II

ISBN 978-84-613-3948-0 Obra completa

D.L. - CS-240-96

Impreso en España

Índice

Capítulo 1	Las fuentes de suministro en un abastecimiento
Capítulo 2	Cálculo hidráulico de tuberías
Capítulo 3	Tuberías, materiales, esfuerzos hidráulicos y normativa
Capítulo 4	Las bombas y su comportamiento
Capítulo 5	Utilización de las bombas
Capítulo 6	Instalación de las bombas
Capítulo 7	Válvulas de control, regulación, protección y operación
Capítulo 8	Medición e instrumentación
Capítulo 9	Aducciones
Capítulo 10	Estudio de transitorios hidráulico
Capítulo 11	Dispositivos para el control de los transitorios

1	Las fuentes de suministro en un abastecimiento	11
1.1	Orígenes del agua.....	13
1.2	Acuíferos	13
1.3.	Obras de captación.....	17
1.4.	Ensayos de bombeo	21
1.5.	Ejemplos de ensayos de bombeo.....	43
1.6.	Tratamientos de potabilización del agua	53
1.7.	Normativa sobre calidad del agua de consumo público	68
1.8.	Referencias bibliográficas	74
 2	 Cálculo hidráulico de tuberías	 75
2.1.	Introducción	77
2.2.	Propiedades del agua.....	77
2.3.	Definición de parámetros. Líneas de alturas geométricas, piezométricas y totales.....	79
2.4.	Clasificación de los flujos	80
2.5.	Ecuaciones básicas e hipótesis simplificadoras.....	81
2.6.	Cálculo de pérdidas de carga en flujos a presión	90
2.7.	Cálculo hidráulico	104
	Anexo I.....	121
 3	 Tuberías, materiales, esfuerzos hidráulicos y normativa	 125
3.1.	Introducción	127
3.2.	Consideraciones generales sobre la selección del material de la tubería	128
3.3.	Principales materiales utilizados en tuberías a presión.....	133
3.4.	Esfuerzos hidráulicos sobre tuberías	139
3.5.	Montaje e instalación de tuberías	146
3.6.	Pruebas de la tubería instalada	147
3.7.	Aspectos más relevantes en la gestión de los proyectos de conductos a presión.....	149
3.8.	Normativa y tuberías normalizadas.....	150
3.9.	Conclusión	152
3.10.	Referencias bibliográficas	154

4	Las bombas y su comportamiento	155
4.1.	Introducción	157
4.2.	Clasificación de las bombas.....	157
4.3.	Partes constitutivas de las bombas.....	158
4.4.	Comportamiento teórico de una bomba.....	160
4.5.	Curvas características reales de una bomba centrífuga.....	165
4.6.	Determinación de las curvas de una bomba en el banco de ensayos.....	178
4.7.	Ajuste analítico de las curvas características	182
4.8.	Clasificación de las bombas atendiendo a diversos criterios.....	185
5	Utilización de las bombas	191
5.1.	Introducción	193
5.2.	Leyes de semejanza en bombas	193
5.3.	Número específico de revoluciones de una bomba	194
5.4.	Utilización práctica de las leyes de la semejanza	196
5.5.	Punto de funcionamiento de una instalación	207
5.6.	Resolución gráfica de sistemas complejos	212
5.7.	Estabilidad de funcionamiento de una bomba.....	217
5.8.	Acoplamiento de bombas.....	218
5.9.	Selección de la bomba, o del sistema de bombeo, más adecuado	226
6	Instalación de las bombas	231
6.1.	Introducción	233
6.2.	Diseño de la cámara de aspiración	233
6.3.	Equipamientos hidráulicos en una estación de bombeo	239
6.4.	La cavitación en bombas	241
6.5.	El cebado de bombas instaladas en aspiración	252
6.6.	El arranque en bombas	254
6.7.	La regulación del caudal en las bombas	258
6.8.	Normativa sobre bombas	261
6.9.	Conclusión	264

7	Válvulas de control, regulación, protección y operación	265
7.1.	Introducción	267
7.2.	Diferentes tipos de válvulas	268
7.3.	Caracterización hidráulica de las válvulas.....	276
7.4.	Cavitación en válvulas	281
7.5.	Válvulas de regulación.....	288
7.6.	Válvulas de control automático	292
7.7.	Válvulas de protección	299
7.8.	Ventosas	304
7.9.	Referencias bibliográficas	313
 8	 Medición e instrumentación	 315
8.1.	Introducción	317
8.2.	Conceptos fundamentales	317
8.3.	Medidores de presión.....	324
8.4.	Medidores de nivel.....	329
8.5.	Medidores de caudal.....	333
8.6.	Contadores.....	346
8.7.	Medida de la calidad del agua.....	359
8.8.	Registro y almacenamiento de mediciones. Data-Loggers.....	361
8.9.	Aspectos a considerar respecto de la instrumentacion en un sistema de telemedida y telecontrol.....	362
8.10.	Referencias bibliográficas	364
 9	 Aducciones	 365
9.1.	Introducción	367
9.2.	Tipos de aducciones	367
9.3.	Planteamiento general del diseño de aducciones	368
9.4.	Diseño de aducciones por gravedad	371
9.5.	Aducciones de bombeo	378
9.6.	Otros tipos de aducciones	388
9.7.	La presencia del aire en la aducciones	390

10	Estudio de transitorios hidráulicos	403
10.1.	Introducción.....	405
10.2.	Perturbaciones en un sistema hidráulico.....	407
10.3.	Análisis de transitorios hidráulicos	421
10.4.	Conclusiones	441
11	Dispositivos para el control de los transitorios	443
11.1.	Introducción.....	445
11.2.	Metodologías a seguir en el control de transitorios	445
11.3.	Volantes de inercia	446
11.4.	Válvulas de cierre programado	447
11.5.	Válvulas de retención	449
11.6.	Chimenea de equilibrio	453
11.7.	Tanques unidireccionales	455
11.8.	Calderín de aire	457
11.9.	Instalación de by-pass en las conducciones.....	472
11.10.	Ventosas.....	474
11.11.	Válvulas de alivio	477
11.12.	Válvulas reguladoras.....	478

Las fuentes de suministro en un abastecimiento

García Ferrando, M., Espert Alemany, Vicent., Sancho Iranzo, H.



1. ORÍGENES DEL AGUA

El agua utilizada para consumo humano proviene normalmente de recursos naturales (aguas superficiales y subterráneas); pero una vez agotados esos recursos, para atender las crecientes demandas, es necesario recurrir a la desalación de aguas salobres o agua de mar.

1.1 El agua superficial

El agua superficial, va a proceder de cualquier tipo de escorrentía que por cantidad, calidad y economía, sea susceptible de ser aprovechada para el consumo humano.

Las aguas superficiales, a diferencia de las subterráneas, son muy vulnerables a la contaminación, pero poseen la ventaja de que es muy fácil detectar el origen de la contaminación y su corrección posterior.

1.2 El agua subterránea

En el ámbito de los países de la CEE, las aguas subterráneas son la base para el abastecimiento público, a excepción de Irlanda, Reino Unido y España; concretamente, en nuestro país la cuota de empleo de recursos hídricos subterráneos en el suministro a poblaciones, es aproximadamente un 30%. Sin embargo, la situación en la Comunidad Autónoma Valenciana se aproxima a la media comunitaria, siendo el porcentaje de agua subterránea de un 62%, pero debido a la contaminación por abonos nitrogenados o por residuos urbanos e industriales, así como por la intrusión salina, esta cuota posee una tendencia claramente regresiva.

Al ser las aguas subterráneas las fuentes de suministro mayoritarias en los pequeños y medianos abastecimientos, son las que estudiaremos más ampliamente en el presente capítulo.

El agua subterránea tiene su origen en el almacenamiento que se produce en el subsuelo, como consecuencia de la permeabilidad del terreno y la existencia de capas impermeables que permiten retenerla. El agua subterránea, procedente de la filtración del agua superficial a través del terreno, va a almacenarse tanto en el interior de las cavidades existentes en éste, como en el espacio intergranular presente entre las partículas que lo constituyen.

De acuerdo con lo anterior, se entiende como **acuífero**, aquél estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros o grietas, permitiendo su aprovechamiento.

Lógicamente, la retención de agua en el subsuelo y su aprovechamiento, van a estar relacionados con las características del medio. Así por ejemplo, un terreno **arcilloso** presenta cierta capacidad de almacenamiento de agua, pero no es aprovechable por cuanto, aún alcanzando el grado de saturación, no la transmite; no obstante, otros tipos de terrenos, tales como los **porosos y detriticos** (gravas y arenas), así como los **kársticos y fisurados** (calizas, dolomitas, basaltos y granitos), o la combinación de ambos (calcoarenitas), si que lo permiten, por cuanto transmiten el agua contenida en su interior.

Desde el punto de vista físico-químico, las aguas subterráneas se caracterizan por lo siguiente: turbiedad baja; contaminación bacteriana débil; temperatura constante; composición química, función del terreno por el que fluye.

2. ACUÍFEROS

Tal como definimos en el apartado anterior, un acuífero es un estrato o formación geológica que permite la circulación de agua por sus poros o grietas, permitiendo su aprovechamiento.

2.1 Tipos de acuíferos

Atendiendo a su geomorfología, los acuíferos podemos clasificarlos en: libres, cautivos y semiconfinados.

Un **acuífero libre** se caracteriza por estar limitado inferiormente, por un estrato impermeable o semipermeable.

La superficie libre del agua se encuentra por debajo del techo del acuífero y, por tanto, está a la presión atmosférica. En estos, al perforar pozos que los atraviesen total o parcialmente -perforación completa o

incompleta-, el lugar definido por los niveles de agua de cada pozo forman una superficie real (superficie freática).

Por otro lado, un **acuífero cautivo** se caracteriza por estar limitado, tanto superior como inferiormente, por un estrato impermeable. En este caso, el agua está sometida a una presión superior a la atmosférica, y ocupa la globalidad de los poros o huecos de la formación geológica que la contiene, saturándola totalmente. Por ello, durante la perforación de pozos en acuíferos de este tipo, al atravesar su techo, se observa un ascenso rápido del nivel del agua. De acuerdo con este nivel y la posición de la cota geométrica del brocal de la perforación, tenemos dos tipos de acuíferos: surgentes y artesianos.

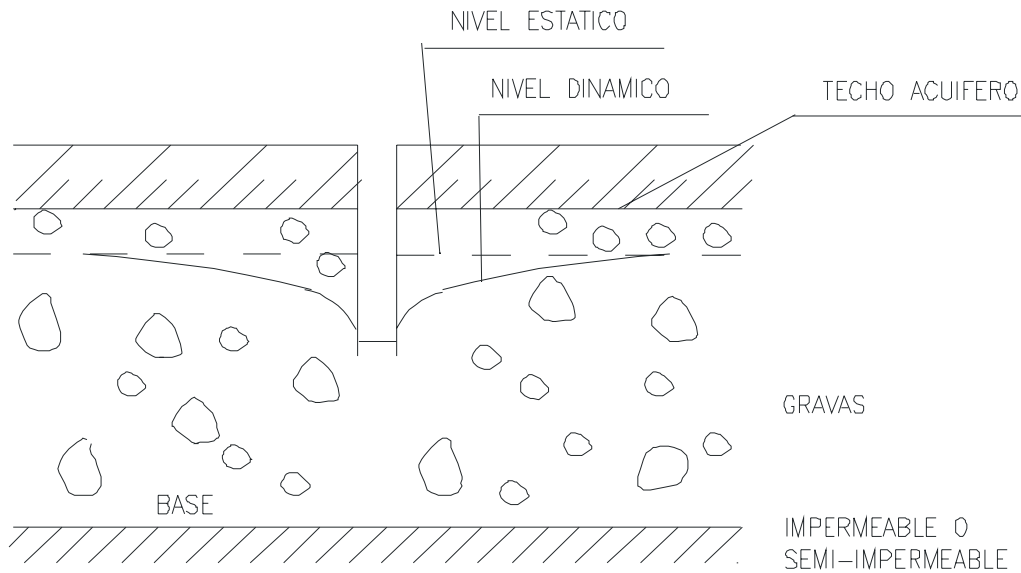


FIGURA 1.1 ACUÍFERO LIBRE

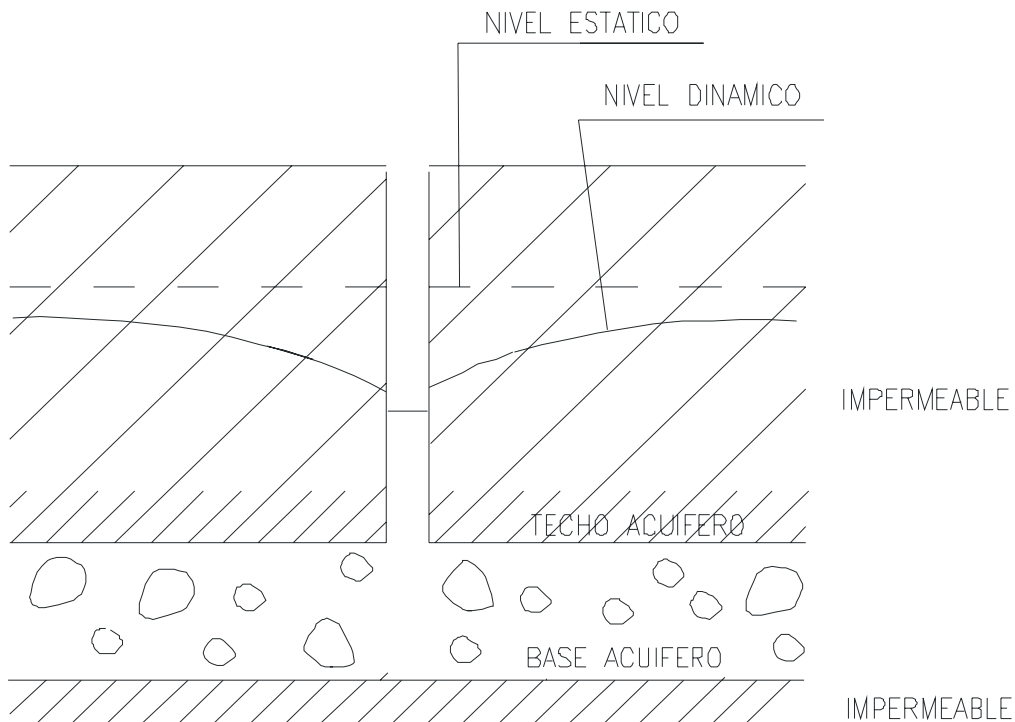


FIGURA 1.2 ACUÍFERO CAUTIVO

El descenso del nivel dinámico del pozo se suele limitar hasta la base del substrato impermeable superior. Si se desciende de ese límite parte del acuífero funciona como libre y el resto como cautivo.

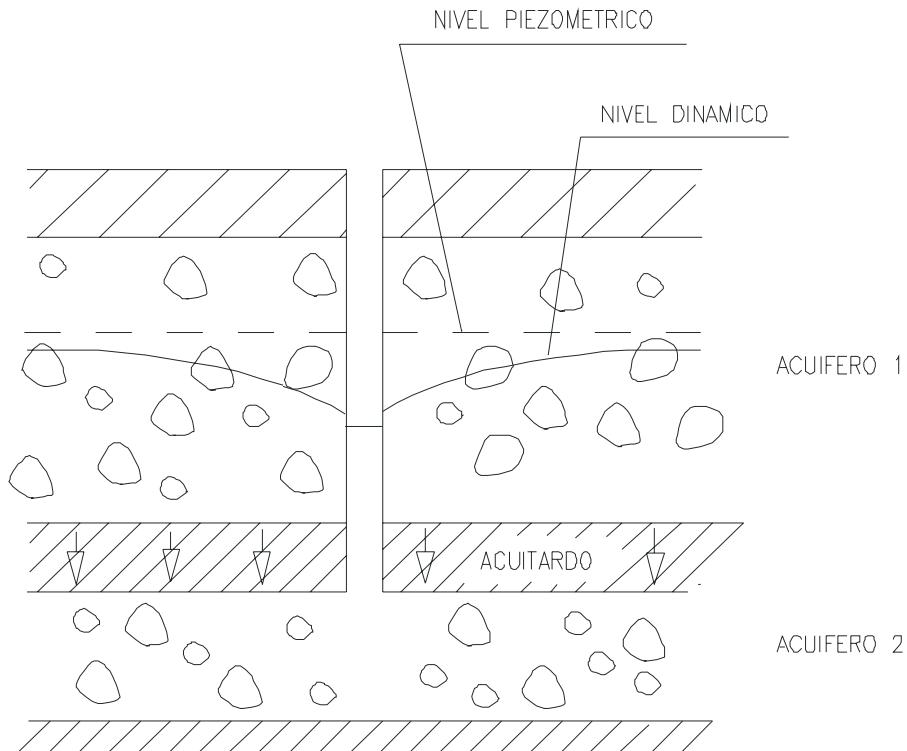


FIGURA 1.3 ACUÍFERO SEMICONFINADO

Los **acuíferos semiconfinados**, a diferencia de los cautivos, van a presentar, como mínimo, un estrato parcialmente permeable, produciéndose a su través la recarga del acuífero principal.

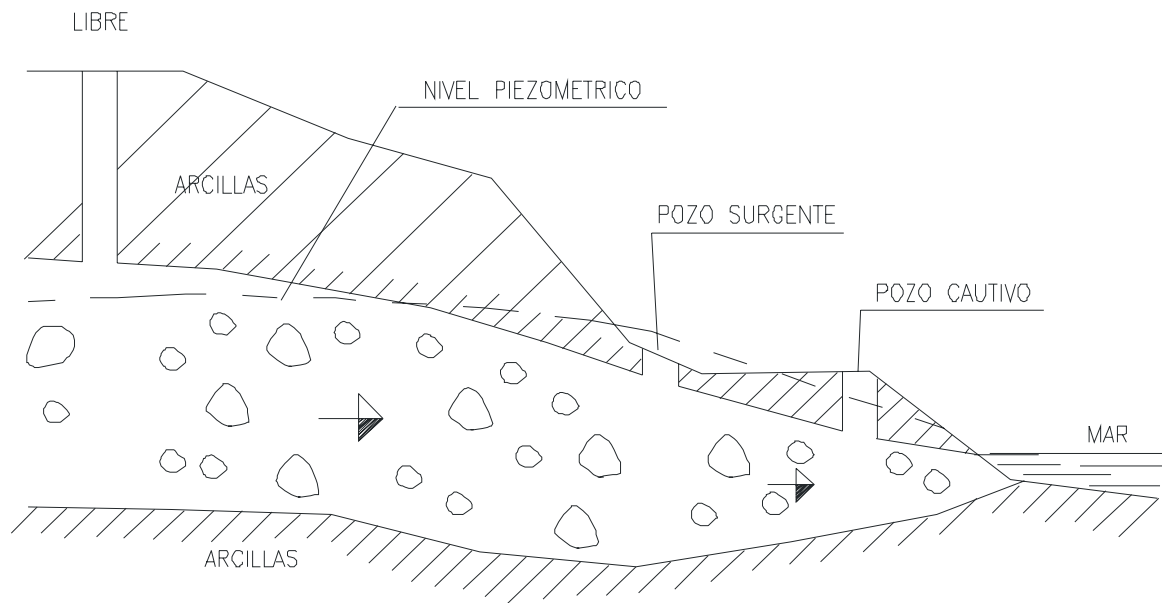


FIGURA 1.4 EJEMPLO DE UN ACUÍFERO

En la Figura 1.4, se expone un ejemplo de un acuífero que en el primer tramo es libre y en el segundo cautivo.

2.2 Parámetros característicos de un acuífero

Los parámetros característicos de un acuífero son los siguientes: el coeficiente de permeabilidad (K), el coeficiente de transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S).

-Coeficiente de permeabilidad (K). El coeficiente de permeabilidad va a venir definido por la Ley de Darcy, aplicable a medios porosos. De acuerdo con ésta, la velocidad de circulación de un fluido a través de un medio poroso va a ser directamente proporcional al gradiente hidráulico, siendo su expresión:

$$v = -K \cdot i \quad (1.1)$$

Al factor de proporcionalidad se le conoce como permeabilidad, y va a depender tanto de la naturaleza del medio como de las características del propio fluido (viscosidad y densidad).

Dimensionalmente se trata de una velocidad, viniendo expresada en m/día.

-Coeficiente de transmisividad (T). Se define la transmisividad como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de anchura unidad y altura igual a la del manto permeable saturado, bajo un gradiente unidad y a una temperatura determinada.

$$T = K \cdot b$$

Sus dimensiones son las de una velocidad por una longitud y se expresa generalmente en m²/día, o en cm²/s.

El concepto de transmisividad está asociado a las posibilidades de aprovechamiento del acuífero, tal y como queda reflejado en la Tabla 1.1.

-Coeficiente de almacenamiento (S). El coeficiente de almacenamiento se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical de acuífero de sección unidad y altura la del acuífero saturado, cuando se produce un descenso unitario del nivel piezométrico. Esta liberación de agua se produce por el efecto combinado de la expansión del agua y la compactación que sufre el terreno, y consiguiente disminución de porosidad, cuando disminuye la presión sobre el acuífero. El coeficiente de almacenamiento es adimensional.

T (m ² /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica.
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica.
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresión teórica.
500 < T < 1.000	Elevada	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica.
T > 1.000	Muy alta	Pozos de más de 100 l/s con 10 m de depresión teórica.

TABLA 1.1. LA TRANSMISIVIDAD Y POSIBILIDADES DE EXPLOTACIÓN DE UN ACUÍFERO
(SEGÚN VILLANUEVA-IGLESIAS)

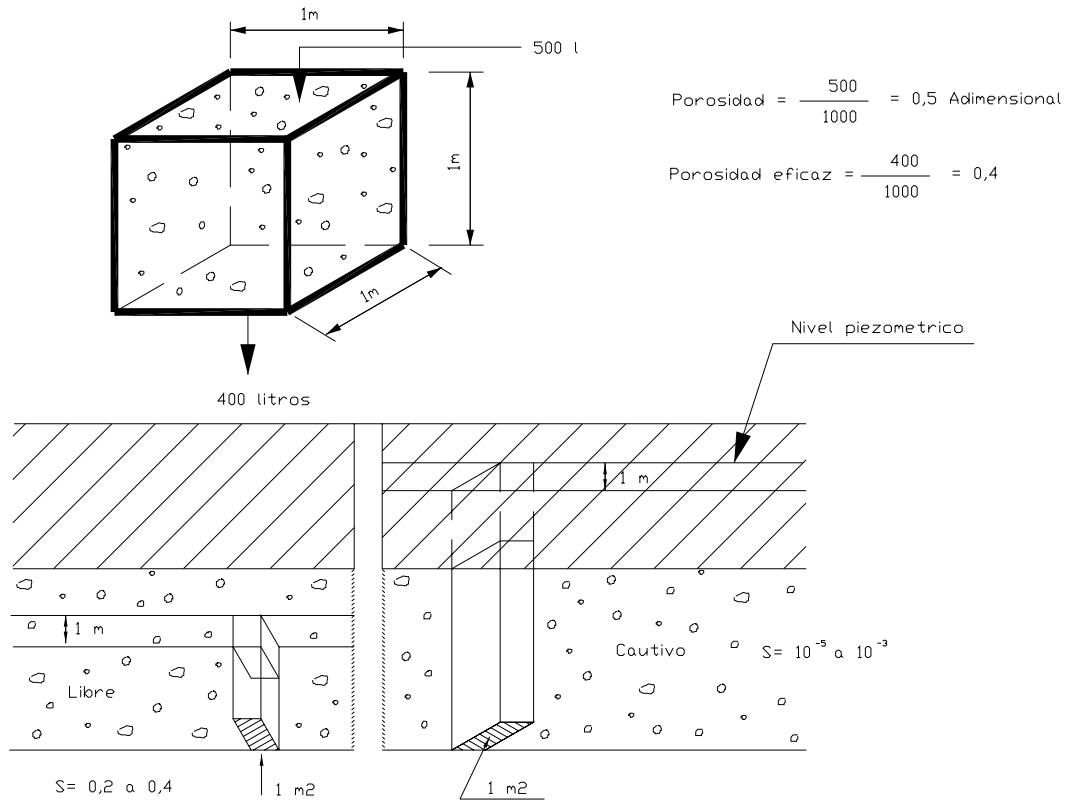


FIGURA 1.5 COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

Este parámetro está íntimamente asociado a las posibilidades de aprovechamiento de un acuífero cautivo, oscilando su valor entre 10^{-5} y 10^{-3} para los acuíferos cautivos y semiconfinados.

En el caso de los acuíferos libres este coincide con la **porosidad eficaz**, definida como el volumen de agua que puede ser extraído por gravedad de un prisma de sección unidad. Su valor oscila entre 0'2 y 0'4. (Ver Figura 1.5)

$$[S] = \frac{m^3 \text{ agualiberada}}{(m^2 \text{ sec c.}) \cdot (m \text{ desc. al t piezométrica})}$$

3. OBRAS DE CAPTACIÓN

3.1 Generalidades

Conocida la existencia de un acuífero, su aprovechamiento pasa por la realización de una obra que permita captar el agua existente. De entre las distintas construcciones que se pueden realizar, a fin de captar el agua subterránea, destacan los pozos o perforaciones de pequeño diámetro (hasta 800 mm). No obstante, éste no es el único tipo de obra posible. Además de las pozos tenemos las galerías, las zanjas, los drenes y los pozos excavados.

3.2 Construcción de pozos

Métodos de perforación

La profundidad a alcanzar, el diámetro o diámetros necesarios, y de manera especial, la naturaleza de los terrenos que hayan de ser atravesados, influirán en la elección del sistema de perforación.

a) Perforación a percusión

Se realiza la perforación mediante el movimiento alternativo (bajada y subida) de una masa pesada que, en su

caída, va fracturando o disgregando la roca, que después es extraída por medio de una cuchara de limpieza.

Este sistema es el más adecuado para terrenos incoherentes, así como en formaciones muy fisuradas.

b) Perforación a rotación con circulación directa

La perforación a rotación se efectúa mediante el giro de una herramienta de corte, que es impulsada por un varillaje. El detritus o ripio producido en el avance, es extraído a la superficie por medio de un fluido que, impulsado por una bomba, circula por el interior del varillaje, para retornar al exterior arrastrando el detritus por el anular existente entre el varillaje y la pared del pozo.

El fluido de perforación, que en general es un lodo bentonítico con ciertos aditivos para adecuar sus características a las necesidades de la perforación, sirve para extraer el detritus, refrigerar el útil de corte y sostener las paredes de la perforación.

c) Perforación a rotación con circulación invertida

Cuando el diámetro de una perforación es grande, la velocidad del lodo en el anular comprendido entre la pared del tubo del varillaje y el terreno, resulta insuficiente para elevar el detritus. Para solucionar este inconveniente, se invierte el sentido de circulación del lodo; es decir, se le hace descender por el anular citado y retornar por el interior del varillaje, el cual, para este sistema, se construye de mayor tamaño (Figura 1.6).

Con lo anterior se logra:

- Una gran capacidad de extracción de detritus debido a la alta velocidad del lodo en el interior del varillaje.
- Pequeña velocidad de descenso del lodo por el anular, con mínimo efecto de erosión en las paredes del terreno.
- Posibilidad de emplear lodos de baja densidad (si el terreno se sostiene) y viscosidad. Con estos lodos ligeros, incluso llega a utilizarse sólo agua, evitándose el riesgo de impermeabilizar acuíferos de poca potencia.

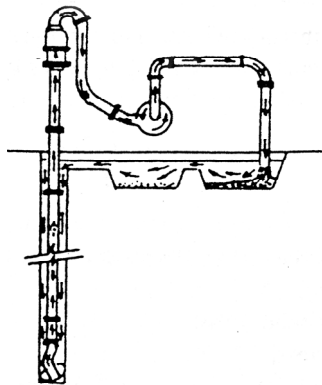


FIGURA 1.6 SISTEMA DE PERFORACIÓN A ROTACIÓN CON CIRCULACIÓN INVERTIDA

Entubación

En este caso cabría distinguir entre entubación provisional y entubación definitiva.

La entubación provisional se instala para sostener los horizontes ya taladrados que son susceptibles de desprendimiento, y que harían imposible la continuación de los trabajos. Una vez se ha colocado la provisional, se perfora por el interior con un taladro de menor diámetro. Hay que tener presente esta eventualidad al inicio de la perforación, para que la entubación definitiva tenga la sección suficiente para instalar el equipo de bombeo. Esta técnica es muy frecuente en percusión, al contrario de lo que sucede en el caso de rotación con circulación de lodos bentoníticos.

La entubación definitiva es la que se coloca para revestir definitivamente el pozo y constituir la conducción hidráulica que pone los acuíferos en comunicación con la perforación.

En ocasiones, el diámetro de la perforación sufre una reducción con la profundidad, dando lugar a entubaciones telescópicas. Las razones de esto se encuentran en el coste de la perforación y de la tubería de revestimiento, así como en la limitación de la máquina de perforar.

A la hora de elegir el diámetro hay que tener en cuenta dos cosas:

- Si el tramo de la tubería que se considera, va unido a la rejilla, el diámetro mínimo de la tubería será aquél que permita una velocidad máxima de paso, a través de ésta, de 3 cm/s, para evitar las incrustaciones que con el tiempo colmatarían la superficie captante.
- Si el tramo de la tubería ha de alojar a la bomba, habrá de permitir su instalación con suficiente holgura.

El espesor del tubo va a depender de los empujes del terreno, y sobre todo de las cargas hidrostáticas que se establezcan por diferencias de nivel entre el interior y el exterior de la tubería.

El dimensionado de la tubería suele hacerse por aplicación de la siguiente fórmula, atribuida a Allievi, y que en función de las dimensiones del tubo (diámetro y espesor), nos permite conocer la carga máxima admisible frente al aplastamiento:

$$p = \frac{2E}{K} \left(\frac{e}{d} \right)^3 \quad (1.2)$$

donde:

p= carga máxima admisible frente al aplastamiento (Kg/cm²).

e= espesor del tubo (cm).

d= diámetro interior del tubo (cm).

K= coeficiente de seguridad (1'5-2).

E= módulo de elasticidad del acero (2,1 10⁶ Kg/cm²).

A fin de tener en cuenta los efectos de la corrosión, el espesor obtenido por aplicación de la expresión anterior, suele incrementarse en 1 mm.

Verticalidad y alineación

Las tolerancias de estos dos parámetros deben permitir la colocación de la bomba sin roces con el revestimiento del pozo, así como de la tubería que le acompaña. Es más importante, dentro de ciertos límites, la alineación que la verticalidad.

El buzamiento (inclinación) de estratos, sobre todo cuando se combina con alternancia de durezas, supone siempre un peligro de desviación de pozos.

Cuando se produce una desviación hay que corregirla inmediatamente. Uno de los procedimientos es cementar y después perforar. Cuando se perfora a percusión, el trépano debe girar libremente, lo que se nota en el cable.

Es frecuente que los pliegos de condiciones prescriban como prueba de alineación de un pozo, el que pueda pasar por él, un tramo de tubería de 12 m de longitud y diámetro ligeramente inferior al de la entubación, sin que roce con las paredes de ésta.

Rejillas

Al terminar un pozo en formaciones acuíferas no consolidadas o poco consolidadas, es importantísimo la instalación de rejillas para retener los materiales sueltos, permitiendo el paso del agua al interior del pozo sin una excesiva pérdida de carga. En el caso de formaciones acuíferas constituidas por arenas finas, debe colocarse, además, un relleno de grava alrededor de la rejilla, cuya talla efectiva se hará en función del tamaño de la arena del acuífero.

El tubo perforado "in situ", por su facilidad de ejecución, y su relativo bajo coste, es ampliamente utilizado como zona filtrante en pozos. Posee el inconveniente de su poca sección de paso (3 al 5%) y una anchura

excesiva (1 a 2 cm) que permite el paso de arenas.

En la rejilla el tamaño de la ranura se fija a partir del análisis granulométrico de la formación acuífera. En pozos sin relleno de gravas, el tamaño de la ranura será tal que retenga del 30% al 50% de la arena. En capas estratificadas se hará en función de la capa del material más fino. En pozos con relleno de grava, las aberturas serán tal que retengan, al menos, el 90% del material del relleno. Hay varias clases de rejillas, las más corrientes son: el filtro puente (admisión lateral del agua) y el filtro Johnson (admisión radial).

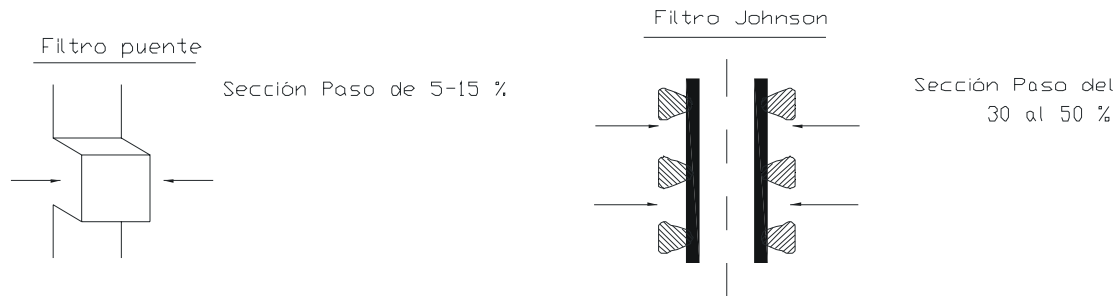


FIGURA 1.7 TIPOS DE REJILLA

La longitud de la rejilla ha de ser la máxima posible, a fin de disminuir la velocidad de paso del agua al atravesarla. No obstante, su longitud debe de limitarse, por cuanto una longitud excesiva puede provocar que ésta se quede en seco para un descenso del nivel dinámico dado, cosa que no es aconsejable. En acuíferos libres de gran espesor, la longitud será de $1/3$ a $1/2$ del espesor de la capa saturada, debiendo colocarse en la parte inferior. En acuíferos cautivos es conveniente que ésta ocupe del 70% al 80% del espesor de la capa.

Como la longitud de la rejilla depende del espesor del acuífero y el tamaño de las ranuras depende de la granulometría de la arena, sólo podremos actuar sobre el diámetro de la rejilla a fin de no sobrepasar la velocidad máxima admisible, 3 cm/s.

En las perforaciones que exista el riesgo de la intrusión salina, la rejilla debe instalarse en la parte alta del acuífero, pero evitando que se pueda quedar en seco.

Rellenos de grava

El relleno de grava es un procedimiento que se utiliza para estabilizar acuíferos constituidos por arenas finas o formaciones muy estratificadas, donde coexisten capas de material fino, entrefino y grueso. Consiste en colocar grava seleccionada entre la parte exterior de la rejilla y la del acuífero. Para ello el diámetro de la perforación tendrá que ser mayor que el de la rejilla.

Una vez conocida la curva granulométrica del material del acuífero, se multiplica el tamaño correspondiente al 70% retenido (d_{30}) por un factor ente 4 y 9. Se emplea el valor 4, si el material de la formación es fino y uniforme, y 6, cuando el material del acuífero es más grueso y no uniforme. Se selecciona un factor entre 6 y 9 si la formación acuífera presenta granulometría muy poco uniforme y limo. El resultado de esta multiplicación será el primer punto conocido de la curva que representa la clasificación del relleno de grava. Se coloca el resultado en el gráfico como el punto correspondiente al 70% de grava retenida (30% que pasa). Por ese punto se traza una curva suave con un coeficiente de uniformidad¹ igual o menor de 2.5. La última etapa es la selección de abertura de la rejilla. Se escoge ésta teniendo en cuenta que debe retener el 90% o más del material del relleno de grava.

El espesor del macizo de gravas debe estar comprendido entre 7.5 y 20 cm. El material adecuado para relleno ha de ser limpio, bien rodado y relativamente uniforme. Ha de contener como máximo un 5% de partículas calcáreas, por si hubiera que acidificar en cualquier momento.

En la Figura 1.8, puede observarse la ejecución de la instalación de un empaque de gravas.

¹ Se define el coeficiente de uniformidad como la razón entre el paso del tamiz que deja pasar el 60% del material (d_{60}) y el que deja pasar el 30% (d_{30}).

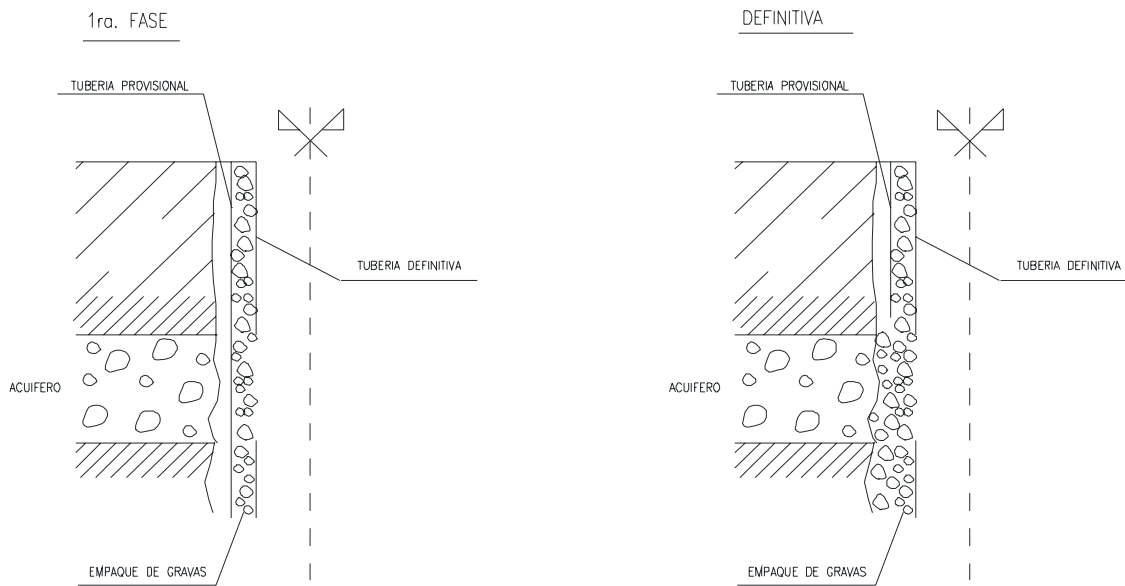


FIGURA 1.8 INSTALACIÓN DEL EMPAQUE DE GRAVAS

4. ENSAYOS DE BOMBEO

Los ensayos de bombeo son la principal herramienta de que se dispone para el estudio del comportamiento de un acuífero y por lo tanto, de un pozo, al permitir correlacionar los caudales extraídos con sus correspondientes descensos, así como, la obtención de los parámetros que definen un acuífero, ya mencionados.

En general los ensayos de bombeo son caros y por tanto, precisan de una correcta planificación con el fin de no cometer errores que impidan posteriormente una adecuada interpretación de los resultados.

Para explicitar el funcionamiento de un acuífero proponemos el siguiente ejemplo (Figura 1.9). Sea una fuente de potencia infinita (un lago de nivel constante), que está interconectada con un depósito mediante una tubería. En el depósito hay instalada una bomba que va a extraer un caudal constante q_B durante toda la prueba.

Al inicio de la prueba, el depósito y la fuente tendrán el mismo nivel. Al no circular agua por la tubería, en el primer intervalo consideramos que el depósito ha proporcionado todo el volumen, descendiendo un nivel d_1 . Al finalizar el primer período, debido al gradiente d_1 , la tubería facilitará un caudal q_{t1} .

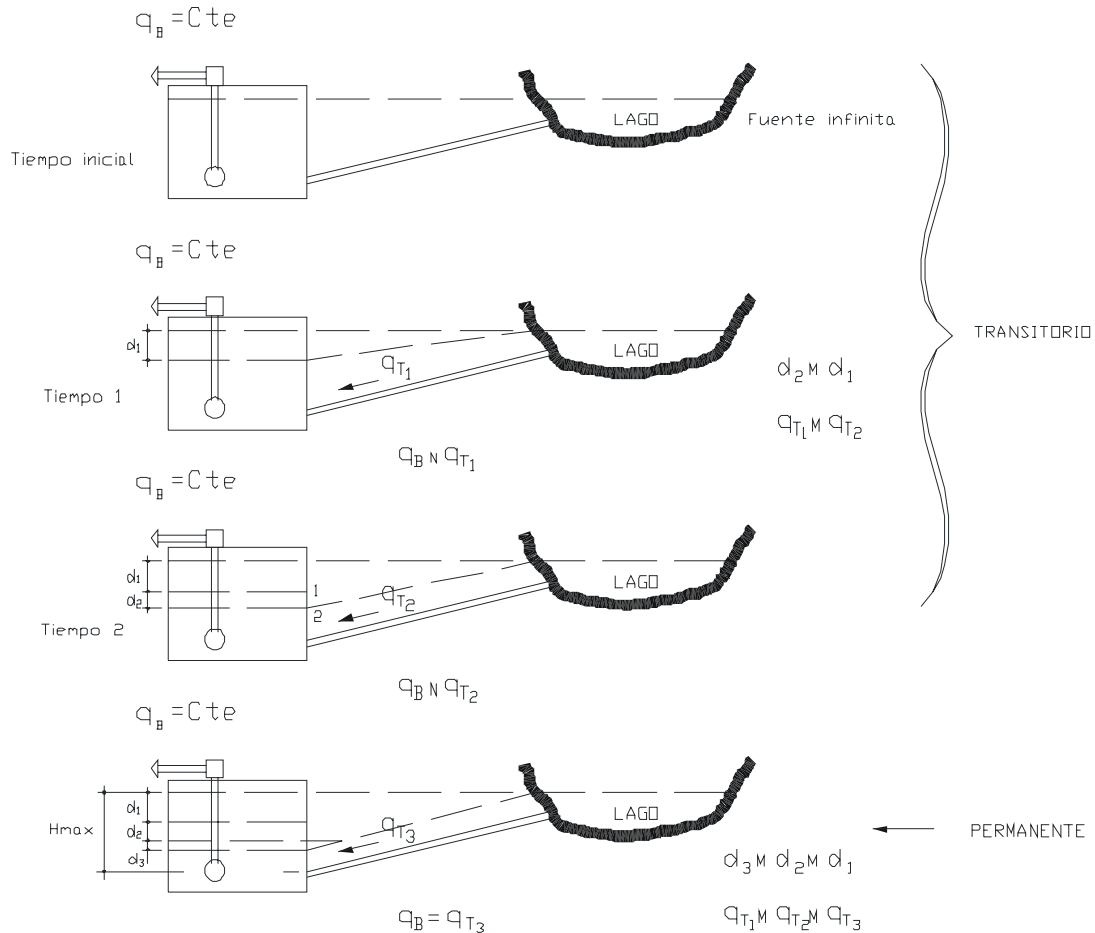


FIGURA 1.9 SÍMIL DE UN ACUÍFERO

Al iniciarse el segundo período de tiempo, si $q_B > q_{T1}$, el depósito deberá proporcionar un caudal, lo que implicará que seguirá descendiendo. Sea d_2 el descenso producido en ese período, que cumplirá la condición de $d_2 < d_1$, porque en este intervalo la tubería ya proporcionaba un caudal mínimo de q_{T1} . Al finalizar el segundo período, como consecuencia del gradiente $d_1 + d_2$ existente, circulará por la tubería un caudal $q_{T2} > q_{T1}$.

Al iniciarse el tercer período si $q_B > q_{T2}$, el depósito continuará descendiendo. Sea d_3 el descenso producido en este período, que verificará la condición de $d_3 < d_2$, porque la tubería entregaba un caudal mínimo $q_{T2} > q_{T1}$. Debido al gradiente $d_1 + d_2 + d_3$ por la tubería circulará un caudal $q_{T3} > q_{T2}$. Así sucesivamente hasta, que q_B sea igual al caudal de la tubería q_t , estabilizándose en ese momento el nivel del depósito; en este momento, se habrá alcanzado el régimen permanente.

Si el caudal de la bomba q_B es superior al caudal que proporciona la tubería q_t bajo un gradiente H_{max} , entonces se producirá un agotamiento del depósito, no alcanzándose un régimen permanente.

El intervalo de tiempo en que no se alcanza un régimen permanente, se denomina transitorio, en el cual proporciona agua tanto la tubería como el depósito, pero en sentido inverso, es decir, cuanto más proporciona la tubería menos lo hace el depósito. Cuando se alcanza el régimen permanente, solo suministra agua la tubería. El funcionamiento descrito del sistema depósito-tubería es similar al comportamiento de un acuífero.

Independientemente del tipo de acuífero, al iniciar un bombeo, el agua proviene de las inmediaciones del pozo y va disminuyendo paulatinamente su nivel. El cono de influencia va incrementándose sin cambiar de forma, de modo que el agua extraída es igual a la liberada por el acuífero en su descenso (Figura 1.10). El período en que los descensos van aumentando se llama régimen no permanente.

Si el acuífero no recibe agua del exterior, todo el volumen extraído procederá del almacenamiento y, por tanto, el régimen será siempre no permanente. Si el acuífero es de extensión muy grande, la velocidad de descenso del cono de influencia va disminuyendo paulatinamente y llega un instante en el que es tan lento que se puede considerar que se ha estabilizado, es decir, que se ha alcanzado el régimen permanente.

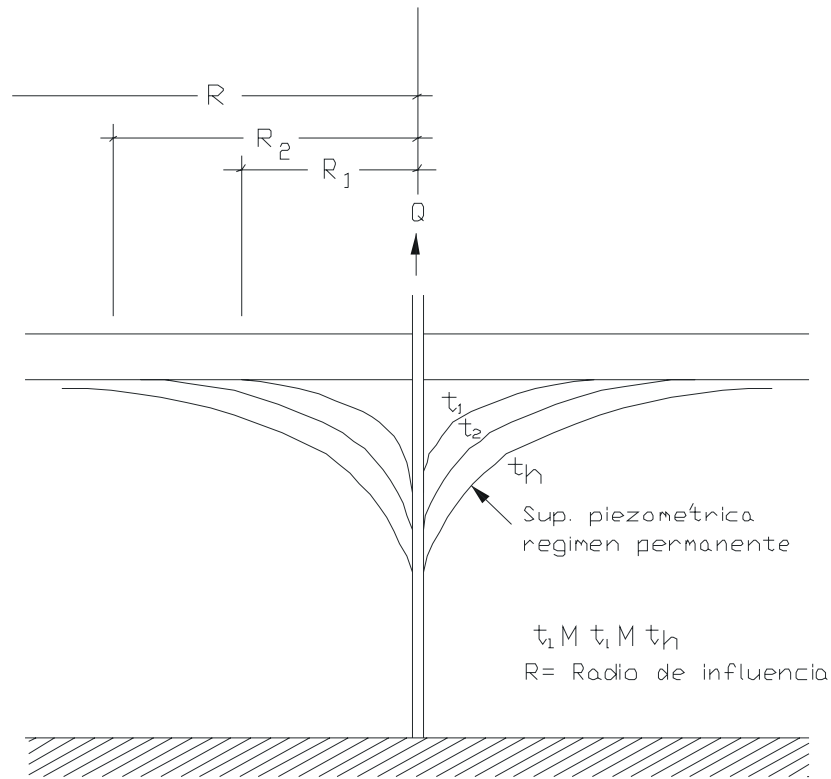


FIGURA 1.10 EVOLUCIÓN DEL CONO DE DESCENSOS

Como los acuíferos semiconfinados reciben una recarga a través del acuitardo, cuando ésta coincida con el caudal extraído se establece un auténtico régimen permanente.

Algunos acuíferos cautivos y libres pueden recibir algo de recarga a través de un límite, y, cuando el cono de influencia alcance dicho límite y coincidan los caudales, se establecerá un régimen permanente.

En el régimen permanente no se toma agua del acuífero, éste es un mero transmisor de la recarga. En el régimen no permanente el acuífero no sólo transmite el agua, sino que la proporciona, bien toda o en parte, influyendo, por tanto, el coeficiente de almacenamiento.

Para la valoración de los ensayos de bombeo admitiremos que se verifican las siguientes condiciones:

- 1) El caudal bombeado es constante y no vuelve a introducirse en el acuífero.
- 2) El acuífero es infinito, homogéneo e isótropo (espacial y temporalmente).
- 3) La perforación ha atravesado el acuífero en su totalidad y no se producen pérdidas de carga al pasar el agua al interior del pozo.
- 4) Que no existe otra extracción del acuífero.

La deducción de las ecuaciones teóricas las obviaremos por no ser objeto del presente tema y existir bibliografía abundante.

4.1 Régimen permanente

Acuífero cautivo

Para este tipo de acuíferos (Figura 1.11), la ecuación que relaciona descensos en cualquier punto del acuífero con los caudales, conocida como ecuación de Thiem, es la siguiente:

$$d = H_0 - h = \frac{0,366Q}{T} \log \frac{R}{r} \quad (1.3)$$

En ésta:

- d = descenso (m).
- h = altura piezométrica (m).
- H_0 = altura correspondiente al acuífero saturado (m).
- Q = caudal (m^3/s).
- T = transmisividad (m^2/s).
- r = distancia del pozo de observación al principal (m).
- R = radio de influencia (m).

El descenso teórico en el pozo, viene dado por:

$$dp = H_0 - hp = \frac{0,366Q}{T} \log \frac{R}{rp} \quad (1.4)$$

siendo rp el radio de la perforación.

El **radio de influencia** representa el máximo alcance del cono de presión. La mayoría de los autores suelen hablar de radio de acción ficticio, por cuanto su estabilización, salvo que existan recargas exteriores, no se consigue en la práctica, nunca. En acuíferos cautivos suele alcanzar valores entre 200 y 10.000 m.

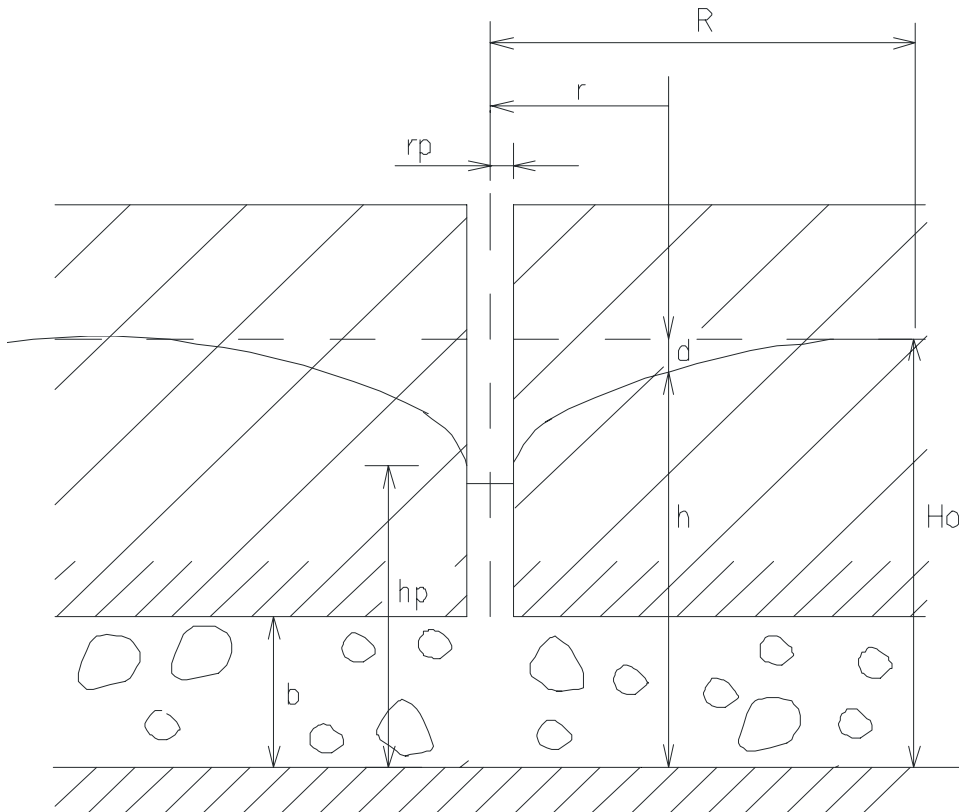


FIGURA 1.11 NIVEL PIEZOMÉTRICO EN ACUÍFERO CAUTIVO (PERMANENTE)

Acuífero libre

Para un acuífero libre, la ecuación de descensos, va a diferir de la que corresponde a un acuífero cautivo, por cuanto, al no encontrarse limitado el acuífero en su parte superior por una capa impermeable, la altura de la sección a través de la que se transmite el caudal, va a ser variable con la distancia al pozo.

La expresión en cuestión, conocida como ecuación de Dupuit, es la siguiente:

$$H_0^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{R}{r} \quad (1.5)$$

Donde:

H_0 = espesor saturado del acuífero (m).

h = altura piezométrica en el punto de cálculo (m).

Como puede observarse, el descenso no es proporcional al caudal, viniendo dado el descenso teórico en el pozo, por:

$$H_0^2 - h_p^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{R}{r_p} \quad (1.6)$$

Un acuífero libre se puede considerar como cautivo si efectuamos la corrección de los descensos observados mediante la siguiente expresión, obtenida a partir de las ecuaciones anteriores.

$$d_c = d - \frac{d^2}{2 H_0} = \frac{0,366Q}{KH_0} \log \frac{R}{r} \quad (1.7)$$

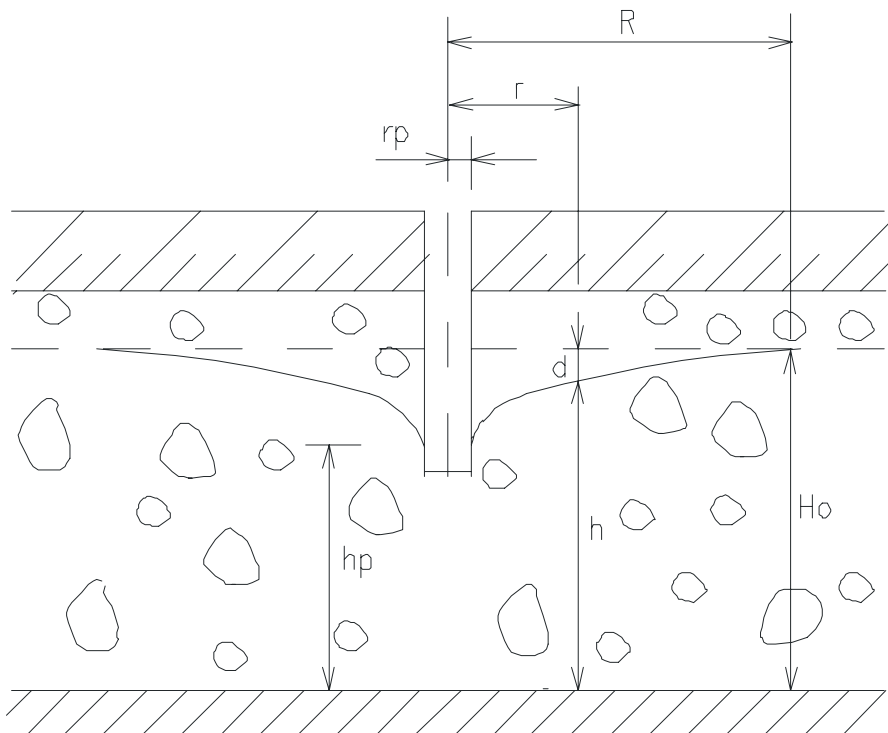


FIGURA 1.12 ACUÍFERO LIBRE

Tanto en acuíferos cautivos, como en acuíferos libres (en este supuesto, si los descensos son importantes, hemos de trabajar con descensos corregidos), podemos exponer la fórmula de Thiem de la siguiente forma:

$$d = \frac{0,366Q}{T} \log R - \frac{0,366Q}{T} \log r \quad \text{PERFIL DE DESCENSOS} \quad (1.8)$$

Influencia del radio del pozo sobre el caudal de extracción

La ecuación que recoge el descenso de un acuífero cautivo o libre sin grandes descensos es:

$$d = \frac{0,366 Q}{T} \log \frac{R}{r} \quad (1.9)$$

y particularizando al pozo de extracción:

$$d_p = \frac{0,366 Q}{T} \log \frac{R}{r_p} \quad (1.10)$$

Veamos la influencia del radio de la perforación sobre el caudal de extracción. Supongamos que deseamos incrementar el caudal n-veces con el mismo descenso, y nos preguntamos cuál será el nuevo radio del pozo.

$$d_{p'} = \frac{0,366 n Q}{T} \log \frac{R}{r_{p'}} \quad (1.11)$$

$$n \cdot \log \frac{R}{r_{p'}} = \log \frac{R}{r_p} \rightarrow r'_{p'} = \sqrt[n]{R^{n-1} \cdot r_p} \quad (1.12)$$

Así, para un pozo de $r_p = 0,20$ m, con un radio de influencia $R = 2.000$ m, si queremos duplicar el caudal de extracción resulta:

$$r'_{p'} = \sqrt{2000 \cdot 0,2} = 20 \text{ m} \quad (1.13)$$

totalmente inabordable desde el punto de vista práctico.

Acuífero semiconfinado

Al ser la transmisividad del acuífero principal muy superior a la del estrato semipermeable que lo separa del acuífero de recarga ($K/K' > 500$), se puede considerar que el flujo de recarga, inmediatamente a su entrada en el acuífero principal, pasa de ser netamente vertical, a ser horizontal.

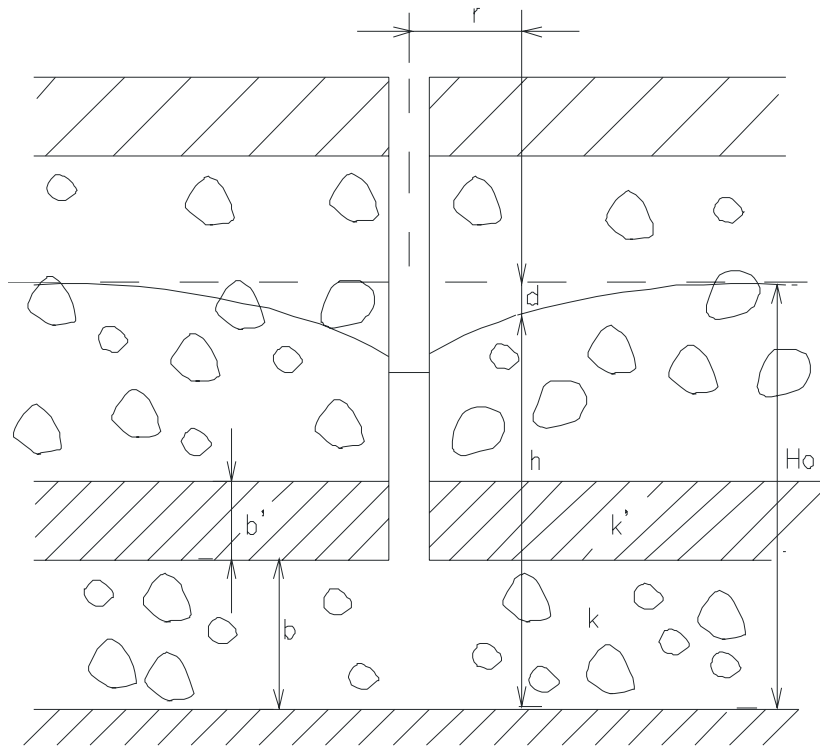


FIGURA 1.13 NIVEL PIEZOMÉTRICO EN ACUÍFERO SEMICONFINADO (PERMANENTE)

De acuerdo con esto, el descenso viene dado por la fórmula de De Glee:

$$d = \frac{Q}{2\pi T} K_0\left(\frac{r}{B}\right) \quad (1.14)$$

donde:

K_0 = función modificada de Bessel de segunda especie y orden cero (Figura 1.14).

B = factor de goteo.

$$B = \sqrt{\frac{T \cdot b'}{K'}} \quad (1.15)$$

T = transmisividad del acuífero.

K' = permeabilidad vertical del acuitardo (acuífero de recarga).

b' = espesor del acuitardo.

Cuando $r/B < 0.1$ puede aplicarse la siguiente aproximación:

$$d = \frac{0,366 Q}{T} \log \frac{1,123 B}{r} \quad (1.16)$$

Puede observarse que el descenso es directamente proporcional al caudal.

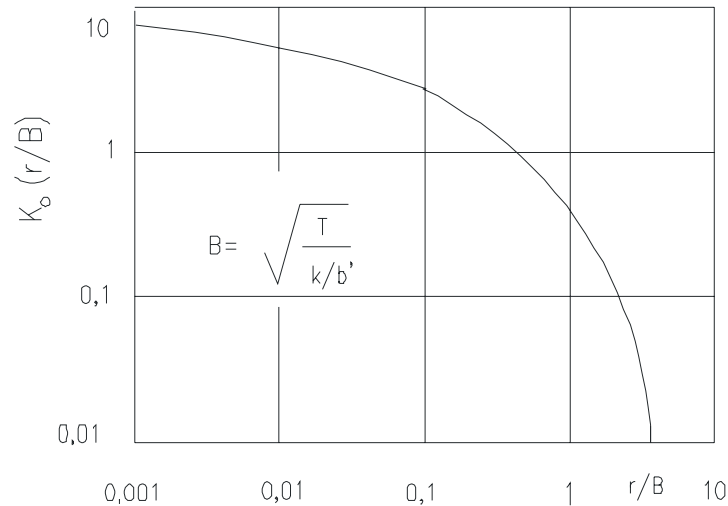


FIGURA 1.14 FUNCIÓN $K_0(r/B)$ PARA ACUÍFERO SEMICONFINADO

Consideraciones generales del régimen permanente

La realización del ensayo de bombeo en régimen permanente va a consistir en bombear a caudal constante hasta que el nivel en los distintos pozos de observación o piezómetros, se estabilice. En este momento la recarga igualará al caudal extraído, alcanzando el cono de influencia su máximo radio. En el caso de un acuífero libre, en el que no existan recargas exteriores, el caudal extraído se obtiene del drenaje del propio acuífero, distinto de lo que sucede con los acuíferos cautivos, en los que el caudal extraído proviene del agua liberada al producirse una disminución de la presión hidráulica a la que está sometido el manto acuífero.

Alcanzado el régimen permanente se medirán los descensos en un mínimo de DOS piezómetros, para a continuación pasar a representarlos gráficamente en función de la distancia al pozo principal. Lo usual es utilizar dos piezómetros situados a cierta distancia de la perforación principal, dado que en las proximidades de ésta, se dan fenómenos no contemplados en la teoría.

De la representación gráfica de los resultados del ensayo, se puede obtener:

- el coeficiente de transmisividad (T);
- la curva característica del pozo para el caudal del ensayo;
- el radio efectivo del pozo;
- el factor de goteo (en acuíferos semiconfinados).

4.2 Régimen transitorio

Acuífero cautivo

La ecuación que relaciona el descenso en un punto situado a una distancia r del pozo de bombeo, con el caudal extraído (Q) y el tiempo transcurrido desde el inicio del bombeo (t), conocida como ecuación de Theis, es la siguiente:

$$d = H_0 - h = \frac{Q \cdot W(u)}{4 \cdot \pi \cdot T} \tag{1.17}$$

donde W(u) es la función de pozo, definida por:

$$W(u) = \int_{\frac{r^2 S}{4 T t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \tag{1.18}$$

Como puede verse la integral anterior es una función dependiente del límite inferior:

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} \quad (1.19)$$

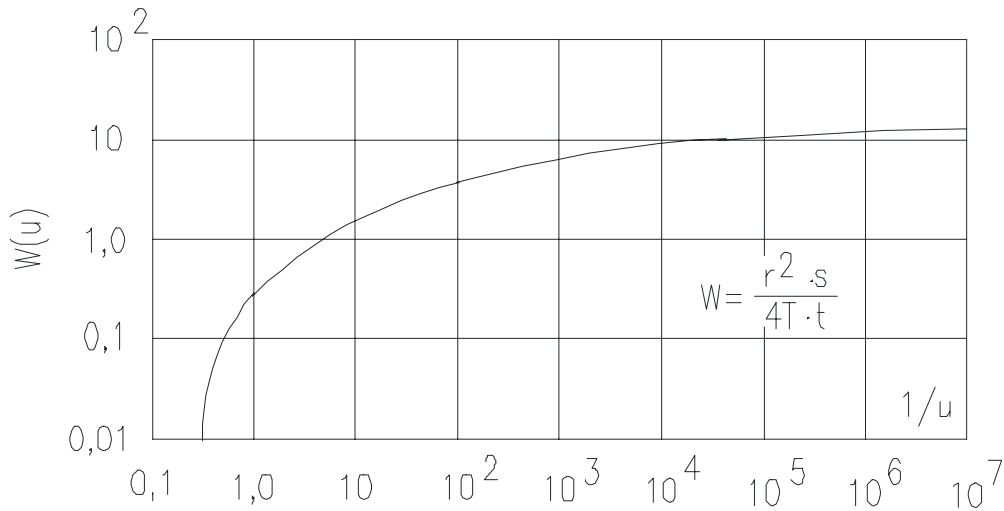


FIGURA 1.15 FUNCIÓN DE POZO EN ACUÍFERO CAUTIVO

Para valores pequeños de $u < 0,03$ (distancia pequeña al pozo y grandes tiempos transcurridos desde el inicio del bombeo), la ecuación puede aproximarse a la siguiente expresión, conocida como ecuación de Jacob:

$$d = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{2,25 T t}{r^2 S} \quad (1.20)$$

Una vez definido el punto de medición r , el descenso en ese punto es función del caudal y del tiempo. El descenso es directamente proporcional al caudal y al logaritmo del tiempo.

Acuífero libre

Para descensos pequeños puede aplicarse la ecuación general (ecuación de Theis) o la aproximación de Jacob. En este último caso, para conseguir cierta precisión, será necesario esperar a que haya transcurrido un tiempo apreciable desde el inicio del bombeo, o bien emplear piezómetros próximos al pozo, por ser el coeficiente de almacenamiento (S) en este tipo de pozos ($0,2 \div 0,4$) muy superior al de los acuíferos cautivos ($10^{-3} \div 10^{-5}$).

Para descensos importantes se pueden realizar los cálculos aplicando la ecuación de Jacob, previa corrección de los descensos por aplicación de la expresión siguiente:

$$d_c = d - \frac{d^2}{2H_0} = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{2,25 T t}{r^2 S} \quad (1.21)$$

luego los descensos no son proporcionales al caudal.

Acuífero semiconfinado

Para los acuíferos semiconfinados vamos a considerar las mismas hipótesis que para los acuíferos cautivos; en este caso, la expresión que relaciona descensos, caudales y tiempo, va a incorporar un parámetro adicional (r/B), respecto a la ecuación de Theis, quedando como sigue:

$$d = \frac{Q}{4 \pi T} W(u, \frac{r}{B}) \quad (1.22)$$

Consideraciones generales para el régimen variable

El ensayo de bombeo en régimen variable va a consistir en medir los descensos o los ascensos (ensayo de recuperación), producidos a lo largo del tiempo, en uno o más piezómetros, manteniendo el caudal constante.

Este tipo de ensayos son mucho más frecuentes que los realizados en régimen permanente. Se caracterizan por precisar de pocos puntos de observación, ser relativamente breves y permitir determinar el coeficiente de almacenamiento.

El ensayo de bombeo en régimen transitorio va a ser previo al ensayo en régimen permanente. A diferencia de lo que sucedía en el ensayo en régimen permanente, éste va a poder realizarse a partir de un único piezómetro de observación. En el supuesto de que sólo se disponga del pozo, permite determinar la transmisividad, pero no el coeficiente de almacenamiento.

En el ensayo de bombeo en régimen transitorio, la información que obtenemos, además de la referida para el ensayo en régimen permanente, es la siguiente:

- Caudal óptimo o aconsejable de explotación del pozo.
- Coeficiente de almacenamiento (S).
- Existencia de barreras.
- Existencia de aportaciones.
- Vaciado de acuíferos.

4.3 Aforo de pozos

A la ecuación que liga los descensos reales en el pozo con los caudales extraídos, se la conoce como ecuación característica. En general, va a estar integrada por dos términos. El primero de estos, lineal con el caudal Q , va a depender en gran manera de las características del acuífero, mientras que el segundo será de la forma $B.Q^n$, y tendrá en cuenta las pérdidas en las proximidades del pozo, tanto las debidas al paso del régimen laminar a turbulento, como las producidas en la rejilla y en el interior de la perforación.

Así:

$$d_{p_r} = A.Q + B.Q^n \tag{1.23}$$

Si lo que se pretende con el ensayo es aforar un pozo, se realizarán una serie de bombeos escalonados para caudales crecientes, durante los cuales se medirán los descensos observados en el pozo de bombeo. El número mínimo será de tres, por cuanto la expresión general anterior, se compone de un término lineal en Q y otro exponencial, también en Q .

Entre los ensayos escalonados, el más empleado consiste en bombear un caudal determinado, para, transcurrido cierto tiempo, incrementar éste sin esperar a que el pozo se recupere. Es importante, que el período durante el que se bombean los distintos caudales, sea el mismo.

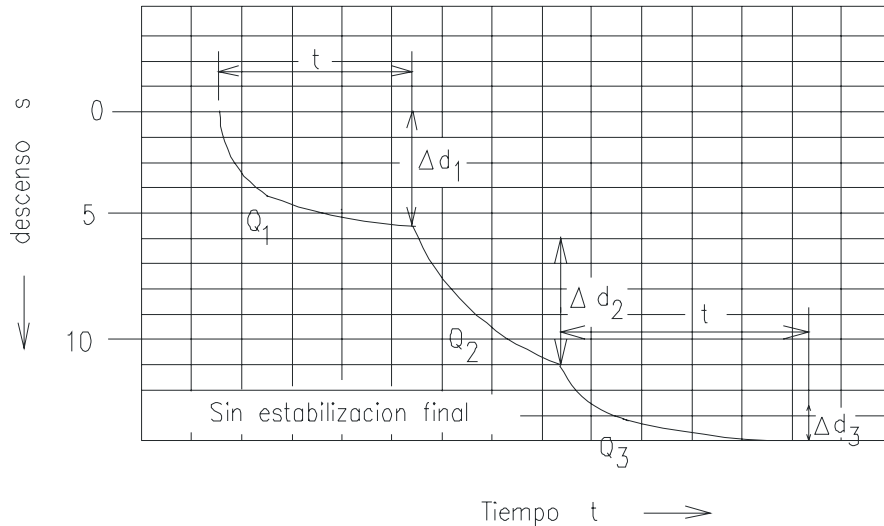


FIGURA 1.16 BOMBEO ESCALONADO

A fin de poder evaluar con exactitud el descenso producido para cada uno de los caudales de bombeo, es conveniente conseguir la estabilización de los descensos (ver Ejemplo 5); no obstante, esto no es totalmente necesario. En el primer caso, el descenso producido para cada uno los caudales, será el medido en el pozo; mientras que en el segundo, los descensos posteriores al primero, los obtendremos por extrapolación de las correspondientes curvas de descenso (Figura 1.16), de tal forma que:

$$d_2 = d_1 + \Delta d_2 \quad (1.24)$$

$$d_3 = d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3$$

Si los distintos descensos no incluyeran las pérdidas en el pozo, el descenso correspondiente a cada uno de los caudales diferenciales, sería el medido.

Los caudales de bombeo deben ser crecientes, de forma que el último escalón coincida con el de explotación previsto.

4.4 Preparación y ejecución de los ensayos de bombeo

En los apartados siguientes vamos a resumir, brevemente, los aspectos más interesantes que deben tenerse en cuenta en la preparación y ejecución de un ensayo de bombeo.

Corte litológico y esquema constructivo del sondeo

A fin de conocer la exacta situación de las zonas filtrantes, diámetros de entubado, tipo de acondicionamiento, sistema de perforación, etc., conviene realizar previo al ensayo, el correspondiente esquema constructivo. Asimismo, conviene disponer de la columna litológica con delimitación de los acuíferos y tipos de terrenos atravesados.

A partir de estos datos se fijará la profundidad de colocación del grupo moto-bomba.

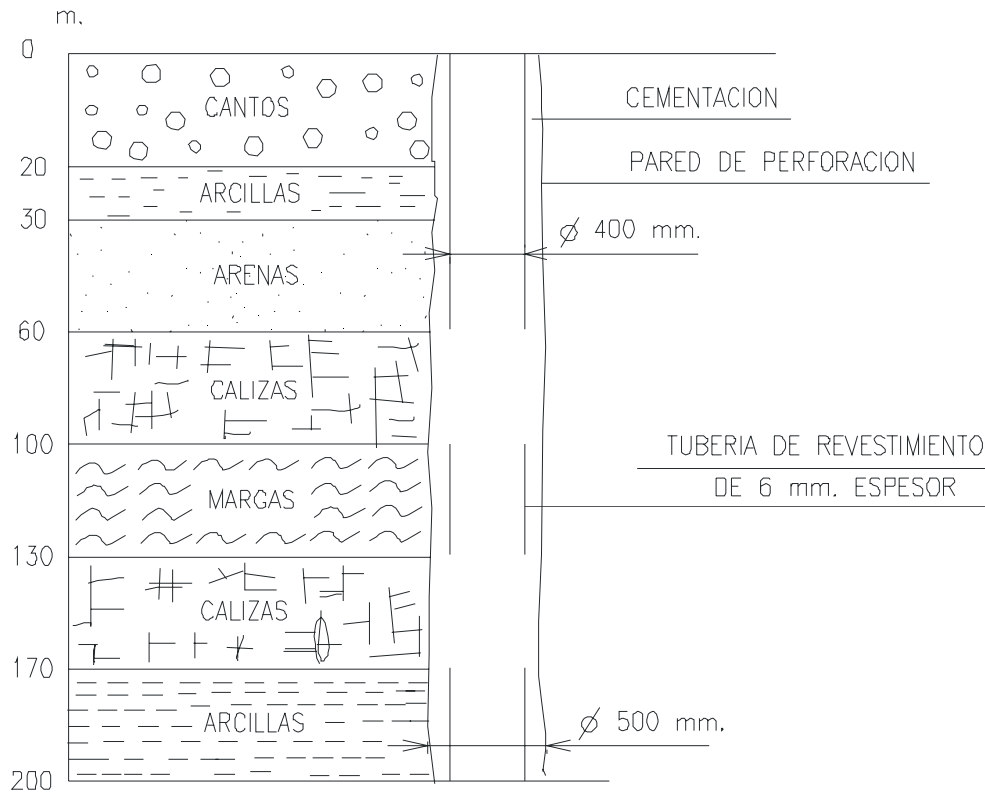


FIGURA 1.17 CORTE LITOLÓGICO Y ESQUEMA CONSTRUCTIVO DE UN POZO

Conocimiento geológico

Previo al ensayo, se aconseja hacer una prospección del entorno, a fin de determinar:

- Presencia de barreras o bordes impermeables.
- Identificar posibles recargas exteriores.
- Establecer posibles influencias con otros pozos.
- Detectar alguna incomunicación con el pozo.
- Determinar posibles drenajes diferidos.

Establecimiento de pozos de observación

Para los aforos no es preciso disponer de puntos de observación distintos al propio pozo de bombeo, pero sí son necesarios para establecer las características de un acuífero mediante un ensayo de bombeo.

La instalación de piezómetros se realiza aprovechando los pozos y sondeos ya existentes.

Conviene nivelar los piezómetros y puntos de observación, por cuanto nos van a servir para detectar la existencia de un flujo natural y para correlacionar los descensos en los distintos puntos de medición.

Selección de la maquinaria y del caudal de bombeo

Conviene que exista una válvula de pie para evitar el retorno al pozo del agua bombeada, tras la parada de la bomba.

En general se emplean bombas centrífugas sumergidas, de característica dura. La alimentación eléctrica se consigue conectando el motor a algún tendido eléctrico próximo o mediante un grupo electrógeno de gasoil.

Medida y ajuste del caudal de bombeo

A fin de medir el caudal bombeado se suele colocar un dispositivo de medida a la salida de la tubería de impulsión.

A fin de mantener el caudal constante se habrá de disponer de una válvula de regulación a la salida del pozo. Dicha válvula deberá de situarse cerca del punto de medida o aforo, a fin de poderla maniobrar cuando se detecte una variación en el caudal bombeado.

Actualmente el bombeo constante se efectúa variando la velocidad de giro del motor.

Vertido del agua extraída

Debe de tenerse especial precaución con el agua extraída, evitando que ésta pueda retornar al acuífero.

En general, el agua bombeada se conducirá hasta una distancia superior al máximo radio de influencia.

Medida de los niveles piezométricos

Los dispositivos más empleados, tanto por su comodidad, como por su precisión y rapidez, suelen ser las sondas eléctricas, bien de un hilo o de dos.

Cuando se introduzca la sonda por el pozo de bombeo, a fin de evitar enganchones con la bomba, se le hará discurrir por el interior de un tubo de plástico rígido o metálico.

Duración de los ensayos de bombeo

a) Descensos

El tiempo a emplear en este tipo de ensayos, dependerá del objetivo que se persiga, así como de las peculiaridades del acuífero a estudiar, y de que se disponga o no de piezómetros.

Cuando lo que se desee sea encontrar valores de transmisividad, para tener una idea de la distribución espacial con el fin de realizar modelos matemáticos, se recurrirá a una serie de bombeos rápidos en régimen permanente, o de corta duración (12 h), en régimen variable.

En el caso de que se pretenda detectar fenómenos anómalos a una cierta distancia del pozo, tales como barreras positivas (recargas) o negativas, o efectos de vaciado, la duración del ensayo será mayor.

También serán de larga duración los ensayos que persigan estudiar fenómenos de drenajes diferidos, sobre todo en formaciones acuíferas de granos muy finos, donde el retraso puede alcanzar varios días.

No resulta correcto cifrar el tiempo de un bombeo con carácter general, por cuanto la aparición de resultados significativos, va a depender de un gran número de factores. Es por ello que en función de los resultados que se vayan obteniendo durante el ensayo, así como de la finalidad del mismo, se fije su duración.

b) Recuperación

Los ensayos de recuperación son muy útiles a la hora de comprobar el grado de conexión del pozo con el acuífero, con la gran ventaja de ser muy económicos.

También son útiles este tipo de pruebas para comprobar si han habido recargas exteriores, o si han existido efectos de vaciado del acuífero, como consecuencia del agua extraída durante el bombeo.

Los ensayos de recuperación, en general, son más cortos que los de bombeo. La duración mínima se puede cifrar en un 10% del tiempo de bombeo. Un tiempo del 30% del tiempo de bombeo, se puede considerar aceptable en la mayoría de casos.

Cuando existan efectos de vaciado, puede ser aconsejable utilizar tiempos de recuperación incluso mayores que los de bombeo.

4.5 Valoración de ensayos de bombeo a caudal constante

Al ser muy compleja la interpretación de un ensayo de bombeo, porque la realidad no se ajusta a la hipótesis de que el acuífero es infinito, homogéneo e isotrópico (temporal y espacialmente), los ensayos de bombeo suelen realizarse a bombeo constante.

La valoración de un ensayo de bombeo la realizaremos a partir de la representación gráfica de los resultados del ensayo.

Dos van a ser los tipos de datos de los que vamos a disponer: los correspondientes a la fase transitoria y los relativos al régimen permanente.

La representación gráfica de los datos referidos a la fase transitoria, descensos y tiempos para cada uno de los piezómetros, la realizaremos en papel semilogarítmico, representando en ordenadas los descensos y en abscisas (semieje logarítmico), el tiempo transcurrido. Puesto que se trata de ensayos a caudal constante, a fin de que este no sufra grandes variaciones durante la fase de descensos, se utilizará una bomba de característica dura en el entorno del caudal a extraer.

Alcanzado el régimen permanente, representaremos gráficamente los descensos medidos en los distintos piezómetros, en función de la distancia de los mismos al pozo de bombeo. En este caso, la representación también se hará en papel semilogarítmico, representado en ordenadas los descensos y en abscisas (semieje logarítmico), las distancias. Variando el caudal bombeado, llegaremos a obtener una familia de curvas que tienen su vértice en el radio de influencia.

Imprecisiones en las medidas de campo, pueden dar lugar a representaciones anómalas que habrá que descartar.

El mínimo número de puntos de observación (piezómetros), con el fin de obtener el perfil de descensos en régimen estacionario, será de dos.

Dado que con la representación de los resultados del ensayo de bombeo, lo que se pretende es llegar a un conocimiento profundo del acuífero, evitaremos disponer los piezómetros en las proximidades del pozo, por cuanto en esta zona se suelen presentar alteraciones de los parámetros del acuífero como consecuencia de posibles rellenos de gravas, engrosamiento del pozo, etc.

Valoración de los ensayos de bombeo en régimen estacionario

a) Pozo en acuífero cautivo (ver Ejemplo 1.1)

La representación gráfica de los descensos obtenidos a partir del ensayo de bombeo, en función de la distancia, (figura 1.18), es una recta de pendiente:

$$m = \frac{2,3 Q}{2 \pi T} = (\Delta d)_{10} = \frac{d_2 - d_1}{\log r_2 - \log r_1} \quad (1.25)$$

la cuál nos permite determinar la transmisividad del acuífero a partir de la diferencia de los descensos entre dos puntos que disten un módulo logarítmico.

Así:

$$T = \frac{0,366 Q}{(\Delta d)_{10}} \quad (1.26)$$

$$d = \frac{0,366 Q}{T} \log \frac{R}{r} = \frac{0,366 Q}{T} \log R - \frac{0,366 Q}{T} \log r \quad (1.27)$$

El radio de influencia (R), lo determinaremos por extrapolación de la recta hasta cortar al eje de abscisas (descenso nulo), mientras que a la abscisa $r = r_p$ le corresponde el descenso teórico en el pozo d_p .

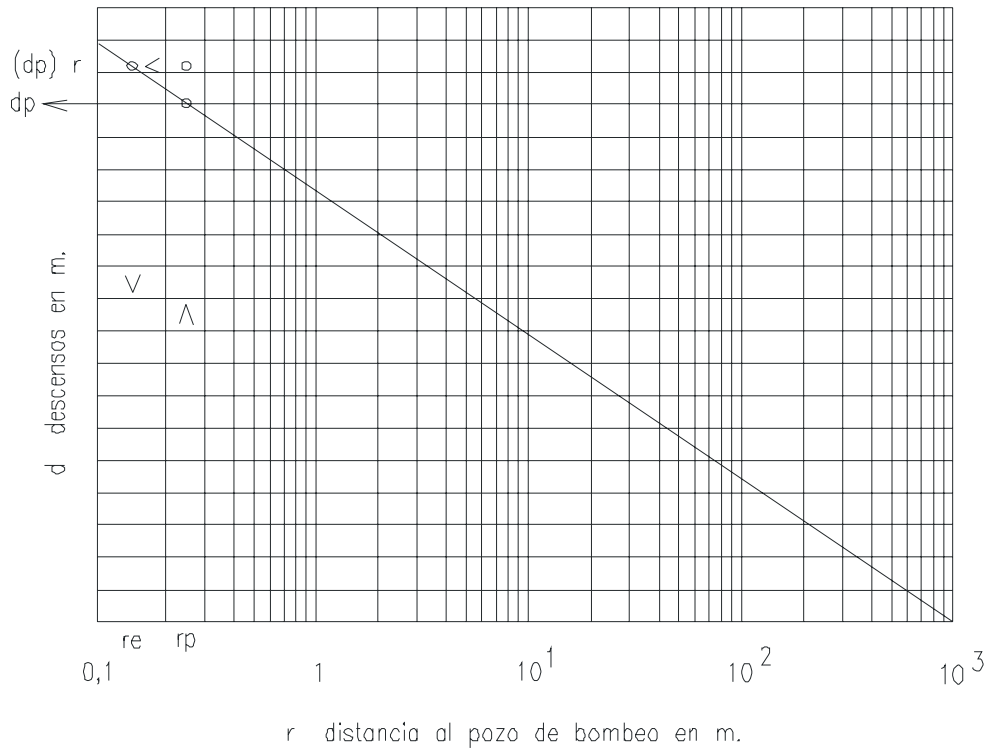


FIGURA 1.18 RECTA DE DESCENSOS PARA UN ACUÍFERO CAUTIVO (PERMANENTE)

Normalmente el descenso medido en el pozo es mayor que el descenso teórico d_p , es decir, $(d_p)_r > d_p$ si bien en algunas ocasiones cuando el pozo ha sido muy desarrollado en sus proximidades (acidificación, macizo de gravas, etc), puede ser $(d_p)_r < d_p$. La distancia para la cual $d_p = (d_p)_r$ se llama radio efectivo de pozo r_e .

Las rectas de descenso ($d \cdot \log r$) para diferentes caudales constantes son un haz de rectas que tienen su origen en ($d = 0$ y $r = R$).

Para poder trazar la recta semilogarítmica se precisan un mínimo de dos piezómetros, no debiéndose emplear el pozo, por las pérdidas exponenciales en sus proximidades.

Cuanto no exista más que un piezómetro, hay que trabajar con el pozo r_p y el piezómetro y el cálculo de la transmisividad no será exacto.

Recordar que el coeficiente de almacenamiento no puede calcularse a partir de las expresiones que caracterizan el régimen permanente.

En este tipo de acuíferos, el caudal específico, definido como sigue:

$$q = \frac{Q}{d_p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot T}{\ln \frac{R}{r_p}} \tag{1.28}$$

va a ser independiente del caudal y del tiempo. Así, admitiendo un valor normal de $r_p = 0'4$ m, y un valor de R comprendido entre 200 y 10.000 m, el caudal específico suele oscilar entre 1'01 y 0'62 T, por lo que se puede considerar, con cierta aproximación, en acuíferos cautivos, que $q = 0'8$ T.

b) Pozo en acuífero libre (ver Ejemplo 1.2)

La representación gráfica de los resultados, al igual que hicimos para el caso de acuífero cautivo, la realizaremos en papel semilogarítmico, siendo necesario dos piezómetros. Si se utiliza el propio pozo, igual que en el caso anterior el cálculo de T no será preciso.

Para pequeños descensos la representación gráfica de los resultados (descensos y distancias), se adapta a una recta; la ecuación correspondiente a este tramo sería:

$$d = \frac{2,3 Q}{2 \pi K H_0} \log \frac{R}{r} \quad (1.29)$$

En este caso, a partir de la pendiente de la recta, o lo que es lo mismo, del descenso entre dos puntos que disten un módulo logarítmico, podremos determinar el coeficiente de permeabilidad (K) y el coeficiente de transmisividad (T), como sigue:

$$K = \frac{2,3 Q}{2 \pi H_0 (\Delta d)_{10}} \quad (1.30)$$

$$T_0 = K H_0$$

Si los descensos son importantes en relación con el espesor saturado inicial, antes de representar gráficamente los resultados obtenidos, corregiremos los descensos observados mediante la aplicación de la ecuación $d_c = d - d^2/2H_0$, pasando a considerar el acuífero como cautivo.

Desde un punto de vista teórico, la ecuación general a aplicar para este tipo de acuíferos es:

$$H_0^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{R}{r} \quad (1.31)$$

Expresando ésta en función del descenso, en lugar de la altura piezométrica, se tiene:

$$Q = 1,366 K \frac{(2 H_0 - d) \cdot d}{\log \frac{R}{r}} \quad (1.32)$$

Para un acuífero dado y un radio de pozo determinado:

$$Q = C \cdot (2 \cdot H_0 - d_p) \cdot d_p \quad (1.33)$$

con lo que la expresión anterior nos queda como sigue:

$$\frac{1,366 \cdot K}{\log \left(\frac{R}{r_p} \right)} = cte \quad (1.34)$$

Como puede verse, el caudal va a ser función de la altura o nivel saturado del acuífero, y del descenso observado en el pozo.

Para este tipo de acuíferos, el caudal específico, viene dado por:

$$q_d = \pi K \frac{2 H_0 - d}{\ln \frac{R}{r}} \quad (1.35)$$

Como puede verse, el caudal específico va a disminuir con el descenso.

c) Pozo en acuífero semiconfinado

Para puntos próximos al pozo de bombeo ($r/B < 0'1$), vimos que la expresión a aplicar era:

$$d = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{1,123 B}{r} = \frac{0,366 Q}{T} \log 1,123 B - \frac{0,366 Q}{T} \log r \quad (1.36)$$

Su representación en papel semilogarítmico del descenso en función de la distancia, es una recta de pendiente 0,366 Q/T.

La extrapolación de la recta nos proporciona el radio de influencia R. En este caso, si $r/B < 0'1$, los parámetros del acuífero podremos calcularlos una vez obtenido R, como sigue:

$$B = \frac{R}{1,123} \quad (1.37)$$

$$T = \frac{2,3 Q}{2\pi (d)_{10}} \quad (1.38)$$

La obtención de los parámetros del acuífero (T, B) para puntos alejados del pozo ($r/B > 0'1$), puede realizarse de forma gráfica (Figura 1.19), procediendo a la superposición de la gráfica de la función $K_0(r/B)$ por un lado, y la correspondiente a la curva real de descensos, obtenida a partir de los datos del ensayo de bombeo. En este caso la representación tiene que realizarse en papel logarítmico. La explicación de la técnica gráfica se encuentra en el hecho de que tras la aplicación de logaritmos a la fórmula de De Glee, ésta, respecto a la representación gráfica de la función $K_0(r/B)$, supone una traslación de $\log(Q/(2\pi.T))$ en ordenadas y de $\log(B)$ en abscisas. Los parámetros del acuífero los obtendremos aplicando el método de coincidencia, esto es, eligiendo un punto al azar (punto de ajuste) y leyendo las parejas (d,r), ($K_0, r/B$). De este modo los parámetros del acuífero los obtendremos como sigue:

$$d = \frac{Q}{2\pi.T} K_0 - T = \frac{Q.K_0}{2\pi.d} \quad (1.39)$$

$$B = \frac{r}{r/B} \quad (1.40)$$

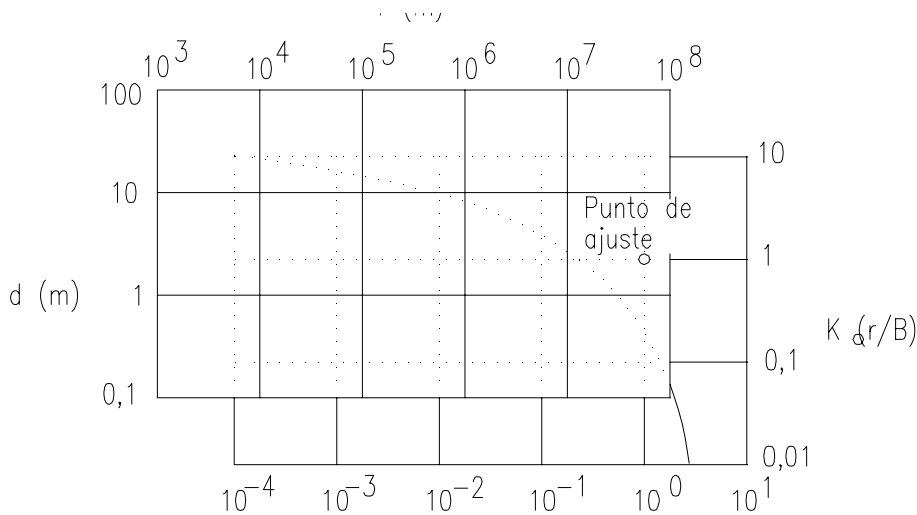


FIGURA 1.19 METODO DE COINCIDENCIA

Valoración de los ensayos de bombeo en régimen transitorio a partir de la curva de descensos

En el ensayo de bombeo en régimen transitorio se toman lecturas de los descensos observados en distintos puntos de observación, a intervalos más o menos regulares de tiempo, pero idénticos en todos los piezómetros.

En el régimen permanente se han necesitado como mínimo dos puntos de observación, siendo muy conveniente no utilizar el pozo como piezómetro, ya que la medida del mismo viene afectada por las pérdidas de la perforación.

Con los ensayos de bombeo en régimen transitorio podemos determinar T y S con un piezómetro, y si sólo disponemos del pozo para efectuar medidas, calcularemos T con aproximación.

a) Pozo en acuífero cautivo (ver Ejemplo 1.3)

En primer lugar consideraremos que se cumple la aproximación de Jacob, es decir:

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} < 0,03 \tag{1.41}$$

hecho que se verifica cuando el piezómetro está próximo al pozo de bombeo y son grandes los tiempos de bombeo. La fórmula de Jacob:

$$d = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{2,25 T t}{r^2 S} = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{2,25 T}{r^2 S} + 0,183 \frac{Q}{T} \log t \tag{1.42}$$

expresa que la fórmula de relación para un piezómetro (r definido), los descensos en ordenadas y el tiempo, en abcisas (semieje logarítmico) es una recta de pendiente positiva:

$$m = \frac{0,183 Q}{T} \rightarrow T = \frac{0,183 Q}{m} \tag{1.43}$$

D= cte
r1 < r2

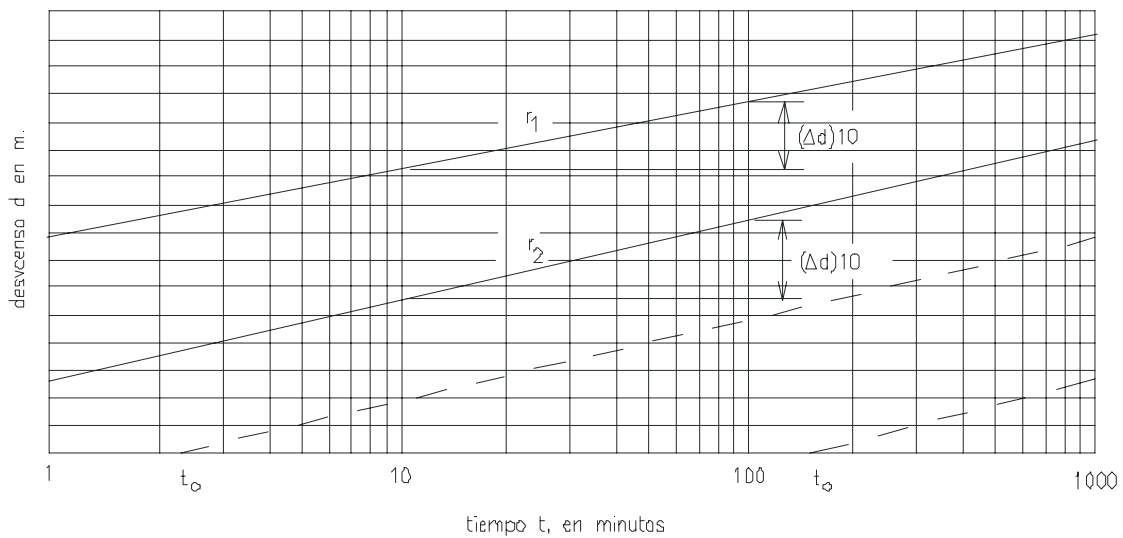


FIGURA 1.20 CURVA DESCENSOS-TIEMPO Q = CTE RI < R2 , TRANSITORIO

La determinación del coeficiente de almacenamiento (S), la realizaremos a partir de la ecuación de Jacob, una vez obtenida la transmisividad (T). En este caso, elegiríamos un punto de la recta d-log t, para el que particularizaríamos la ecuación anterior, donde, conocida la distancia del piezómetro al pozo de bombeo, la única incógnita es el coeficiente de almacenamiento (S).

Otro método para la obtención del coeficiente de almacenamiento (S), es a partir del tiempo transcurrido (t0) entre el inicio del bombeo y el instante en que el cono de influencia alcanza al piezómetro de observación. La determinación del tiempo t0 se obtiene por extrapolación de la recta d-log t, hasta que ésta corte al eje de abcisas (d=0). Conocido t0, la determinación del coeficiente de almacenamiento es inmediata, a partir de la ecuación de Jacob. En este caso también sucede que el único parámetro desconocido es el coeficiente de almacenamiento (S). Su obtención se realiza por aplicación de la siguiente expresión:

$$S = \frac{2,25 T t_0}{r^2} \quad (1.44)$$

Una vez calculados T y S hay que recalcular los valores de t y r que hacen que:

$$u = \frac{r^2 S}{4 t T} = 0,03 \quad (1.45)$$

a fin de eliminar los valores de $u > 0,03$.

En algunos casos nos vemos obligados a reajustar las rectas.

También se podría utilizar la representación semilogaritmica ($d, \log r$) para cada valor de t, pero se necesitan un mínimo de dos piezómetros.

Cuando no se dispone más que el pozo, tendremos que trabajar con la curva $[d, \log t]$:

$$(dp)r = dp + \Delta dp \quad (1.46)$$

$$dp = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{2,25 T t}{r p^2 S} \quad (1.47)$$

$$(dp)r = \left[\frac{0,183 Q}{T} \log \frac{2,25 T}{r p^2 S} + \Delta dp \right] + \frac{0,183 Q}{T} \log t \quad (1.48)$$

por tanto, las curvas $[(dp)r, \log t]$ siguen siendo una recta cuya pendiente es idéntica a la de un piezómetro; podremos, en consecuencia, calcular T. Sin embargo, S no podrá ser obtenido, ya que la recta queda desplazada a un valor desconocido y nos vemos imposibilitados de calcularlo.

En el supuesto de que la ecuación de Jacob no pueda aplicarse ($u > 0,03$), habrá que recurrir a la ecuación de Theis:

$$d = \frac{Q \cdot W(u)}{4 \pi \cdot T} \quad \text{siendo} \quad u = \frac{r^2 S}{4 \cdot T \cdot t} \quad (1.49)$$

En este caso procederemos de la misma manera a como hicimos al obtener los parámetros para un acuífero semiconfinado; esto es, representaremos en papel logarítmico, tanto la función de pozo, como la curva d/t , para un piezómetro.

$$\log d = \log \frac{Q}{4 \pi \cdot T} + \log W(u) \quad (1.50)$$

$$\log t = \log \frac{r^2 S}{4 \cdot T} + \log \left(\frac{1}{u} \right) \quad (1.51)$$

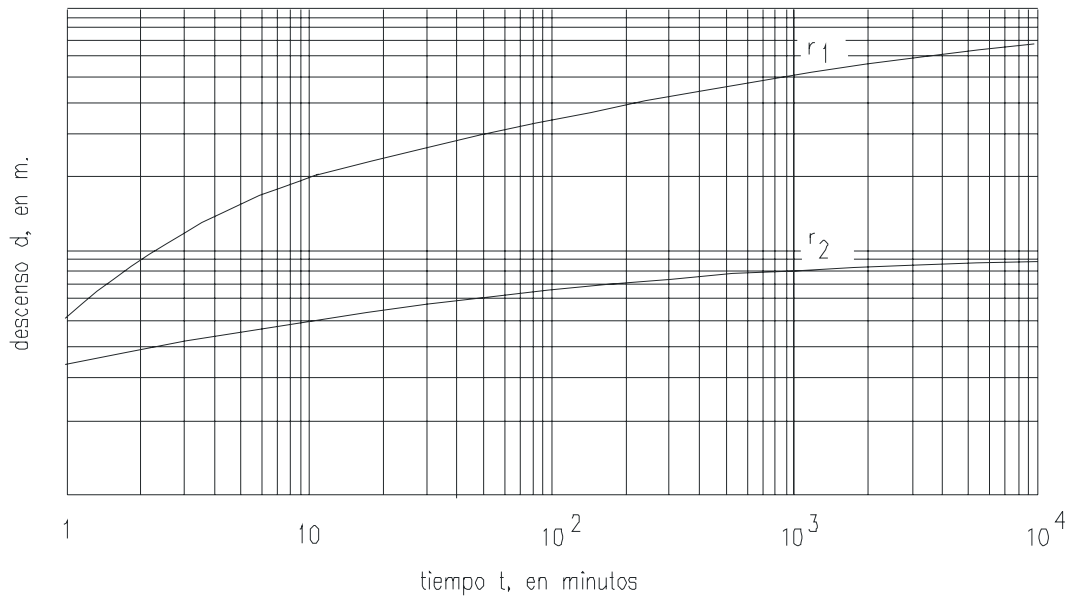


FIGURA 1.21 CURVA DESCENSOS-TIEMPOS $Q = \text{CTE}$ Y $r_1 < r_2$ (TRANSITORIO)

La curva $[\log d, \log t]$ es una traslación de la curva $[\log W(u), \log(1/u)]$ de valor:

$$\log \frac{Q}{4\pi T} \text{ en el eje de ordenadas y}$$

$$\log \frac{r^2 S}{4T} \text{ en el de abscisas}$$

Aplicando el método de coincidencia a uno de los puntos pertenecientes a las dos curvas superpuestas, obtendremos cuatro valores: $d_0, t_0, W(u_0), u_0$ de donde calcularemos T y S .

$$T = \frac{QW(u)_0}{4\pi d_0} \tag{1.52}$$

$$S = \frac{4T t_0 u_0}{r^2}$$

b) Pozo en acuífero libre

Si los descensos son pequeños comparados con el espesor del acuífero, se pueden aplicar las fórmulas de Theis y Jacob $T = KH_v$. Cuando los descensos son importantes hay que efectuar la corrección de descensos $d_c = d - d^2/2H_v$.

Hay que tener cuidado al aplicar la fórmula de Jacob, ya que, al ser en este tipo de acuíferos S mucho mayor, para que se cumpla $u < 0,03$ se requiere que haya transcurrido mucho tiempo ó utilizar piezómetros muy próximos al pozo.

c) Pozo en acuífero semiconfinado

La fórmula que define el fenómeno es la de Hantush:

$$d = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u, \frac{r}{B}\right) \text{ siendo } u = \frac{r^2 S}{4Tt} \text{ y } B = \sqrt{\frac{T}{k'/b'}} \tag{1.53}$$

El procedimiento es similar a la del acuífero cautivo debiéndose emplear la representación $[\log d, \log t]$

Valoración de los ensayos de bombeo en régimen transitorio a partir de la curva de remonte

Una modalidad del ensayo en régimen transitorio es el de la curva de remonte. En este caso, tras la parada del bombeo se produce una recuperación del pozo y su zona de influencia. Desde un punto de vista teórico, equivale a mantener el bombeo inicial, mediante el que extraemos un caudal $+Q$, y superponer un bombeo con un caudal extraído de $-Q$ (Ver fig. 1.22). Haciendo uso de la aproximación logarítmica y llamando t' al tiempo transcurrido desde la parada, tenemos que:

$$d = \frac{0,183.Q}{T} \left[\log \frac{2,25.T.t}{r^2.S} - \log \frac{2,25.T.t'}{r^2.S} \right] = \frac{0,183.Q}{T} \log \frac{t}{t'} \quad (1.54)$$

A partir de la representación gráfica de la recta de remonte, $d - \log(t/t')$ se puede determinar la transmisividad (ver Ejemplo 1.4), como sigue:

$$T = \frac{0,183.Q}{(\Delta d')_{10}} \quad (1.55)$$

La recuperación puede analizarse tanto en piezómetros como en el propio pozo de bombeo. En este último caso el equipo de bombeo debe disponer de una válvula de pie para evitar el retorno, y el diámetro del pozo debe ser pequeño comparado con el acuífero. El ensayo de recuperación debe durar como mínimo un 10 por 100 del de bombeo, siendo aconsejable que sea un 30 por 100.

La recuperación puede considerarse como un ensayo de bombeo obteniendo los ascensos teóricos MN, que no son medibles directamente. Debemos incrementar los ascensos medibles PN, con los descensos estimados MP que se obtienen prolongando la curva. A través de los ascensos teóricos podemos calcular el coeficiente de almacenamiento, siempre que el punto de medición sea diferente del pozo de bombeo.

En acuíferos semiconfinados hay que calcular los parámetros del acuífero a través de los ascensos teóricos como acabamos de mencionar. Si el nivel está estabilizado, el ascenso teórico coincide con el medido.

En acuíferos libres, si los descensos son pequeños se puede aplicar lo especificado para cautivos; en caso contrario, hay que recurrir a los ascensos corregidos.

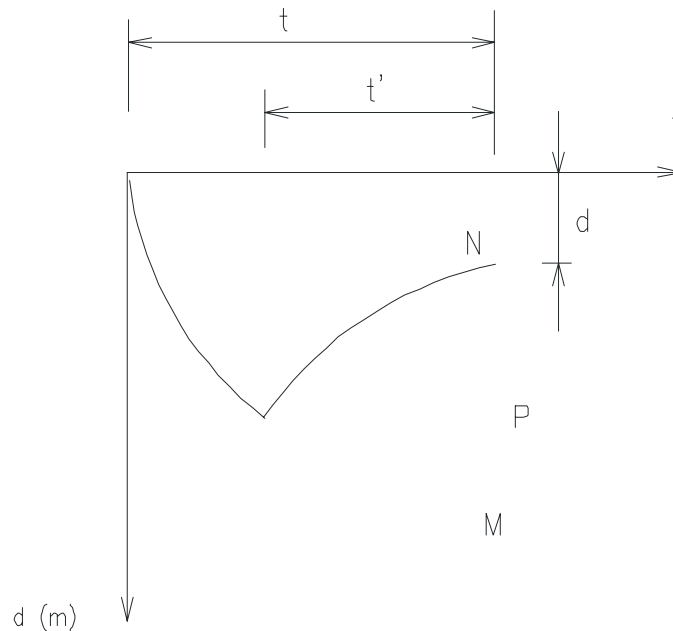


FIGURA 1.22 RECUPERACIÓN DE NIVELES

Si representamos en un papel semilogarítmico la recta

$$d - \log\left(\frac{t}{t'}\right)$$

ésta debe pasar por $d=0$ para $t/t' \rightarrow 1$.

Si la recta corta al eje de abscisas en puntos superiores a 1, quiere decir que se ha producido una recarga y que el acuífero se recupera más de prisa de lo previsto, o que se ha producido una variación del coeficiente de almacenamiento (S menor) por compactación del terreno. Normalmente la recta corta a $d = 0$ en puntos mayor que 1, pero no rebasa generalmente el valor 2.

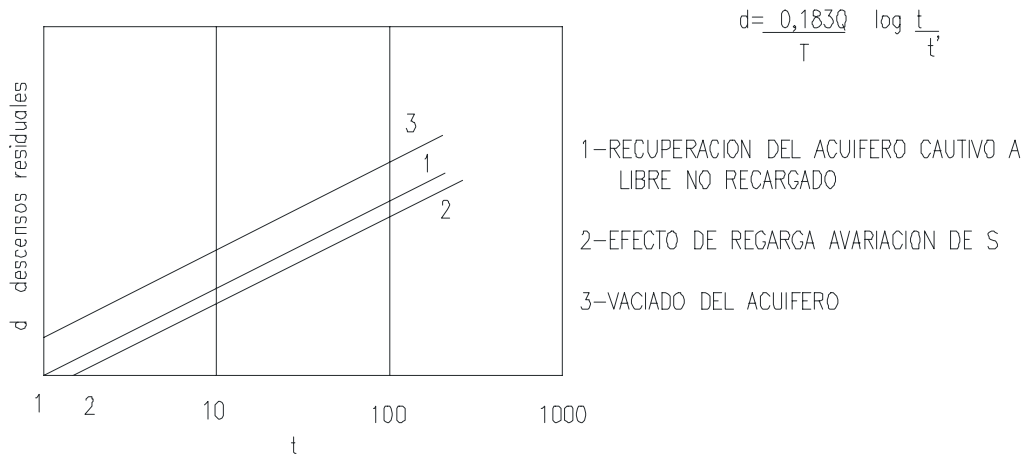


FIGURA 1.23 RECUPERACIÓN DEL ACUÍFERO CAUTIVO O LIBRE

Si la recta corta al eje de abscisas en puntos de $(t/t' < 1)$ quiere significar que al final del bombeo no se alcanzará el nivel inicial, es decir, se producirá un vaciado del acuífero, pero hay que tener la precaución de que no ha sido debido a una variación del nivel estático cuando el bombeo sea largo.

4.6 Campos de pozos, afecciones mutuas

Cuando en un acuífero existe una serie de pozos que están extrayendo o inyectando agua en el mismo, el valor del descenso o aumento del nivel producido en un punto del acuífero es la suma de los descensos parciales que originarían cada uno de los bombeos en dicho punto. Esto es así, porque las leyes del flujo subterráneo son soluciones de la ecuación de continuidad y al ser ésta una ecuación diferencial de segundo orden, la combinación lineal de sus soluciones es también una solución.

Supongamos que existen n sondeos bombeando a caudales constantes Q_1, Q_2, \dots, Q_n , durante tiempos t_1, t_2, \dots, t_n situados a las distancias r_1, r_2, \dots, r_n de un punto del acuífero que se está estudiando.

Si el acuífero es cautivo y no se ha alcanzado el régimen permanente:

$$d = \frac{1}{4\pi \cdot T} \sum_{i=1}^n Q_i W(u_i) \text{ siendo } u_i = \frac{r_i^2 S}{4 \cdot T \cdot t_i} \tag{1.56}$$

Si se puede aplicar el método de Jacob por ser $u < 0,03$ para todos los bombeos:

$$d = \frac{2,3}{4\pi \cdot T} \sum_{i=1}^n Q_i \log \frac{2,25 \cdot T \cdot t_i}{r_i^2 S} \tag{1.57}$$

Si se hubiese alcanzado en todos los bombeos el régimen permanente:

$$d = \frac{2,3}{2\pi \cdot T} \sum_1^n Q_i \log \frac{R_i}{r_i} \tag{1.58}$$

Igual que se ha calculado para los acuíferos cautivos se haría para los semiconfinados y libres.

5. EJEMPLOS DE ENSAYOS DE BOMBEO

Ejemplo 1.1: Parámetros de un acuífero cautivo

En un acuífero confinado se ha realizado un ensayo de bombeo con una extracción a caudal constante de 40 l/s; los niveles se han estabilizado después de cuarenta y ocho horas de trabajo. Los descensos se recogen en la tabla siguiente. El diámetro del pozo es de 400 mm. Calcular:

- 1) Transmisividad del acuífero.
- 2) Radio de influencia y descenso teórico en el pozo.
- 3) Pérdida de carga en el pozo.

Distancia al pozo de bombeo (m)	$r_p = 0,2$	10	40	100
Descenso observado (m)	16,0	7,0	5,05	3,80

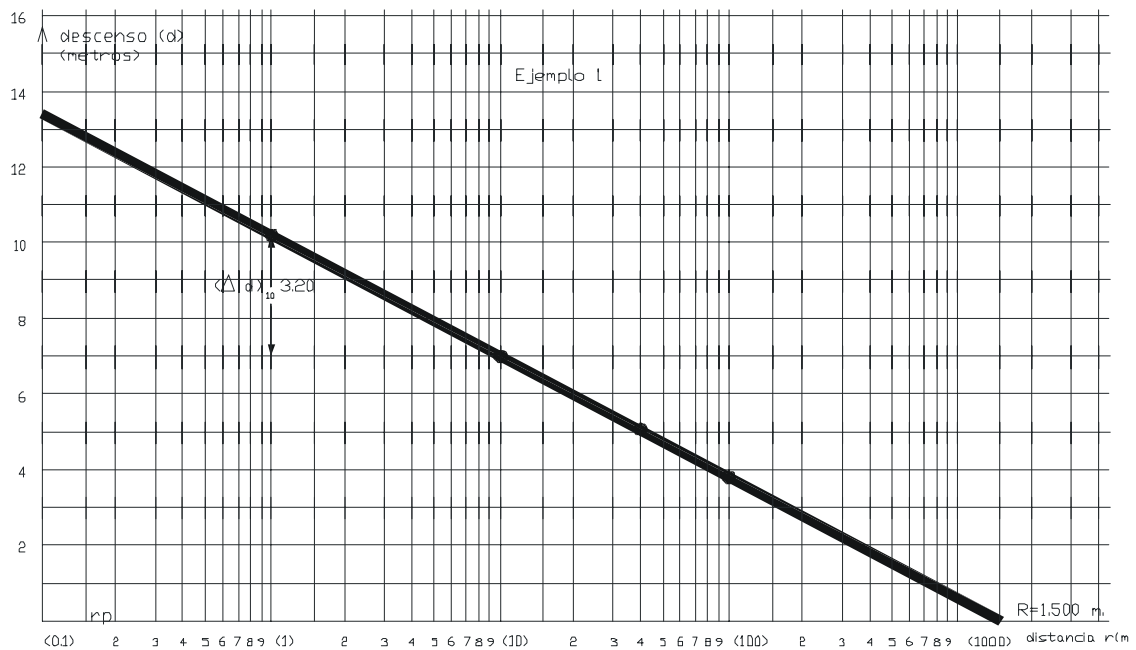


FIGURA 1.24 EJEMPLO 1.1

1) Para la obtención de la transmisividad utilizaremos el método gráfico representando la curva de descensos en papel semilogarítmico [d, log r]. (Ver gráfica adjunta).

La transmisividad del acuífero la calcularemos en función del descenso correspondiente a un módulo 10 de distancias, $(\Delta d)_{10}$, y viene dado por:

$$T = \frac{2,3 \cdot Q}{2\pi \cdot (\Delta d)_{10}} \tag{1.59}$$

De la gráfica se obtiene: $(\Delta d)_{10} = 3,2$ m. En consecuencia:

$$T = \frac{2,3 \cdot 3 \cdot 456}{2 \cdot \pi \cdot 3,2} = 395 \text{ m}^2 / \text{día}$$

2) El radio de influencia (R) se obtendrá directamente de la curva $[d, \log r]$ y coincide con el punto de corte al eje de abscisas. En nuestro caso:

$$R = 1.500 \text{ m.}$$

El descenso teórico del pozo se determinará, bien gráficamente (abscisa correspondiente a $r = R_p$), o bien sustituyendo en la ley de Thiem.

$$d_p = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T} \ln \frac{R}{r_p} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 4,58 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{1.500}{0,2}$$

$$d_p = 12,4 \text{ m.}$$

3) La pérdida de carga se obtendrá como la diferencia entre el descenso observado y el descenso teórico.

$$\Delta h_p = d_{p,obs} - d_p = 16,0 - 12,4 = 3,6 \text{ m.}$$

$$\Delta h_p = 3,60 \text{ m}$$

Ejemplo 1.2: Parámetros de un acuífero libre

Un acuífero se ha estabilizado después de bombear durante un tiempo un caudal constante de 35 l/s. El espesor saturado del acuífero es de 45 m y el diámetro del pozo de 400 mm.

La medición de los niveles se ha realizado en el pozo y en cuatro piezómetros situados a 4, 10, 40 y 100 m.

Distancia al pozo (m)	$r_p = 0,2$	4	10	40	100
Descenso del pozo (m)	22,80	13,0	9,10	6,10	3,80

Calcular:

- 1) La transmisividad del acuífero.
- 2) El radio de influencia.
- 3) La pérdida de carga en el pozo.
- 4) La permeabilidad.

1) Comenzaremos por representar gráficamente los descensos observados y tratándose de un acuífero libre, con fuertes descensos respecto al espesor saturado, obtendremos la ley de descensos corregidos según Dupuit.

Para un acuífero cautivo la curva de descensos viene dada por la expresión:

$$d = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T} \ln \frac{R}{r} \tag{1.60}$$

en tanto que para un acuífero libre, y según la corrección de Dupuit:

$$d_c = d - \frac{d^2}{2 \cdot H_o} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T_o} \ln \frac{R}{r} \text{ con } T_o = K \cdot H_o \tag{1.61}$$

La tabla siguiente representa los descensos medidos, así como los corregidos:

r (m.)	r _p	4	10	40	100
d (m.)	22,80	13,0	9,10	6,10	3,80
d _c (m.)	17,05	11,10	8,20	5,70	3,65

que se ha representado en el gráfico adjunto.

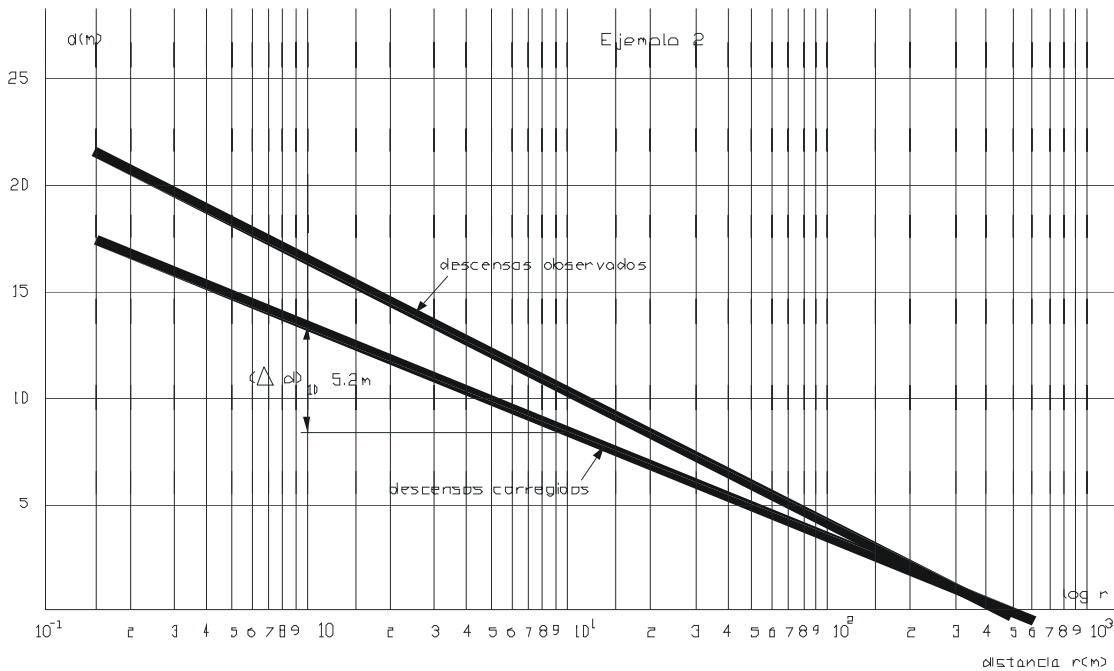


FIGURA 1.25 EJEMPLO 1.2

El módulo de descenso logarítmico $(\Delta d)_{10} = 5,2$ m. Por tanto:

$$(\Delta d)_{10} = \frac{(\ln 10) Q}{2\pi \cdot T_o}; T_o = \frac{(\ln 10) \cdot Q}{2\pi \cdot (\Delta d)_{10}}$$

$$T_o = \frac{2,303 \cdot 35.86,4}{2\pi \cdot 5,2} = 213 \text{ m}^2 / \text{dia}$$

2) El radio de influencia es el punto de corte de la recta corregido o sin corregir con el eje de las abcisas. Lógicamente, este punto debería ser el mismo en ambas rectas; sin embargo, difieren ligeramente como consecuencia del ajuste realizado a la nube de puntos que representan los descensos.

En nuestro caso se obtiene un radio de influencia entre 420 y 460 m.

3) La pérdida de carga en el pozo se obtendrá como diferencia entre el descenso observado en el pozo para $r = r_p$, y el valor correspondiente a la intersección de la vertical $r = r_p$ con la recta ajustada a los puntos de observación.

$$\Delta h_{\text{pozo}} = 22,80 - 20,20 = 2,60 \text{ m.}$$

4) Por último, la permeabilidad se obtendrá por cociente entre la transmisividad y el espesor saturado del acuífero.

$$K = \frac{T_o}{H_o} = \frac{213}{45} = 4,7 \text{ m/día}$$

Ejemplo 1.3: Ensayo de bombeo en un acuífero cautivo

En un ensayo de bombeo a caudal constante de 80 l/seg. realizado sobre un acuífero cautivo se midieron los niveles en función del tiempo de bombeo, en el mismo pozo y en un piezómetro situado a 100 m. del eje de la perforación. Los resultados de las mediciones se recogen en la siguiente tabla:

Tiempo de bombeo	Descenso pozo	Descenso
t (min)	d _p (m.)	d (m.)
1	1,20	-
2	3,00	-
3	4,52	-
4	5,56	-
5	6,72	-
6	7,32	-
8	8,86	-
10	9,85	-
15	12,16	-
20	13,76	-
25	14,90	-
30	15,43	-
40	16,51	-
50	17,60	-
60	17,88	0,24
70	19,05	0,36
80	20,85	0,51
90	21,30	0,60
100	21,92	0,84
150	24,20	1,68
200	26,00	2,51
300	28,05	4,00
400	30,15	5,15
600	31,50	7,10
800	33,75	8,40
1.200	34,52	10,75
2.000	37,30	15,90
3.000	41,24	17,40
6.000	42,80	19,50

Se desea calcular la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento del acuífero según :

- 1) Método de coincidencia de Theis.

Para seguir leyendo haga click aquí