

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

MATERIA HIDROGEOLOGIA

MANUAL PARA LA INTERPRETACION DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO

MATERIAL DE M.C. ALFREDO OCHOA GRANILLO

PARTE V

4. REPRESENTACION GRAFICA DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO

4.1 INTRODUCCION

Para representar los resultados de los ensayos de bombeo ha sido costumbre utilizar tres tipos de gráficos:

- a) gráficos de tiempo-abatimiento
- b) gráficos de distancia-abatimiento
- c) gráficos de tiempo-distancia-abatimiento

Estos gráficos se han utilizado normalmente para determinar las propiedades hidrogeológicas y otras características de los acuíferos, [\(1\)](#) sin embargo, la probabilidad de que ocurra flujo no lineal hacia el pozo de extracción limita las posibilidades de utilización de los mismos en relación con lo acostumbrado. [\(5\)](#)

La representación gráfica de los resultados de los ensayos puede hacerse en escala aritmética, logarítmica o semilogarítmica. Los gráficos en escala aritmética se utilizan poco y tienen escaso valor práctico. [\(4\)](#) Los gráficos en escala logarítmica son útiles para reconocer el tipo de acuífero [\(3\)](#) y para determinar las propiedades de los mismos. Los gráficos semilogarítmicos son los que más se utilizan y los que brindan en general una mayor potencialidad de análisis.

Los gráficos de tiempo-abatimiento representan la relación entre el abatimiento, S_r , en un punto del acuífero situado a una distancia r del centro del pozo de bombeo y el tiempo, t , a partir del comienzo del bombeo. Generalmente el tiempo se representa en el eje de las abscisas y el abatimiento en el eje de las ordenadas.

Los gráficos de distancia-abatimiento representan el abatimiento que se ha producido en un instante de tiempo, t , determinado a partir de que se inició el bombeo, a las distancias radiales a que se encuentran los distintos puntos del acuífero. O sea, que este tipo de

gráfico describe la forma del cono de abatimiento o depresión para un instante determinado. Generalmente la distancia se representa en el eje de las abscisas y el abatimiento en el de las ordenadas.

Como se ha visto, la información que brinda el gráfico de tiempo-abatimiento es para un punto determinado del acuífero y la que brinda el de distancia-abatimiento es para un tiempo determinado. Para analizar en un solo gráfico los diferentes puntos del acuífero para los distintos tiempos, es costumbre utilizar gráficos que relacionan el abatimiento con la cantidad t/r^2 (1, 4) y que el autor ha denominado gráficos de tiempo-distancia-abatimiento (5).

Se sabe que la ecuación general del flujo hacia un pozo en régimen impermanente no lineal está expresada para acuíferos libres y confinados, por:

$$S_r = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t}{r^2 E} + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_r^2} \cdot \frac{(r_o - r)}{r r_o} \quad (3.4)$$

lo que puede expresarse abreviadamente como:

$$S_r = S_D + S_T \quad (4.1)$$

donde: S_D , componente lineal del abatimiento, expresada por el primer término del segundo miembro de la ecuación 3.4

S_T , componente turbulenta del abatimiento, expresada por el segundo término del segundo miembro de la ecuación 3.4

Sobre la base de la representación gráfica de esta ecuación se hará a continuación el análisis de la utilización de los distintos tipos de gráficos y sus limitaciones.

4.2 USO DE LOS GRAFICOS DE DISTANCIA-ABATIMIENTO

Los gráficos de distancia-abatimiento se presentan generalmente en dos formas:

- a) en escala aritmética
- b) en escala semilogarítmica

El gráfico en escala aritmética tiene poca utilidad y prácticamente no se usa.

Los gráficos en escala semilogarítmica relacionan S_r con $\log r$. Para analizar la utilización de este tipo de gráficos hay que distinguir si el flujo hacia el pozo es lineal en todo el campo de flujo alrededor del mismo, ($r_p < R_P$).

Para el caso del flujo lineal, la ecuación general 3.4 queda reducida a la componente lineal del flujo, o sea que:

$$S_r = S_D = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t}{r^2 E} \quad (4.2)$$

Para régimen lineal impermanente, los gráficos semilogarítmicos de distancia-abatimiento para un instante determinado se preparan en papel semilogarítmico, con el abatimiento en la ordenada en escala aritmética y la distancia en escala logarítmica en el eje de las abscisas, y son en realidad una representación gráfica en ese instante de la traza de la superficie del cono de depresión en un plano vertical, o sea, de la curva de abatimiento. En este caso, la curva de abatimiento estará representada por una recta, tal como muestra la figura 4.1.

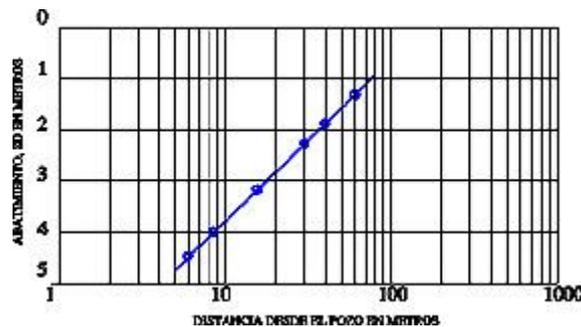


Fig. 4.1

Representación de la curva de abatimiento en gráfico semilogarítmico

Porqué para flujo lineal la curva de abatimiento en escala semilogarítmica es una recta, puede reconocerse analizando la ecuación 4.2. De acuerdo con dicha ecuación, para un tiempo determinado, $t = \text{constante}$, la diferencia de abatimiento entre dos puntos situados a las distancias r_1 y r_2 del centro del pozo principal (el punto 2 es el más alejado) puede expresarse como:

$$S_{D1} - S_{D2} = \frac{Q}{4\pi T_D} \left(\ln \frac{2,246 T_D t}{r_1^2 E} - \ln \frac{2,246 T_D t}{r_2^2 E} \right) \quad (4.3)$$

como T_D y t son constantes, resultará:

$$S_{D1} - S_{D2} = \frac{Q}{2\pi T_D} \ln \frac{r_2}{r_1} = 0,366 \frac{Q}{T_D} \log \frac{r_2}{r_1} \quad (4.4)$$

Se ve claramente que la ecuación 4.4 representa una recta en el plano abatimiento-logarítmico de la distancia. En esta situación la intersección de la recta con el eje de las abscisas ($SD = 0$), representa el radio de influencia (r_0) para el instante considerado. Además se podrán determinar T_D y E en condiciones de flujo lineal (4, 6). En forma general se recomienda que haya información al menos de tres puntos para poder trazar una buena recta de ajuste.

Sin embargo, en el caso del flujo no lineal, la representación no es una recta, sino una curva que quedará claramente definida por dichos tres puntos.

Si se analiza la ecuación 3.4 se puede observar que la componente turbulenta del abatimiento puede expresarse también como:

$$S_T = \frac{Q^2}{4\pi^2 T_r^2} \cdot \frac{1}{r} - \frac{Q^2}{4\pi^2 T_r^2} \cdot \frac{1}{r_o} \quad (4.5)$$

La representación de la ecuación general no lineal (ecuación 3.4) en el gráfico S_r vs $\log r$ para un tiempo fijo, se hará analizando sus componentes:

La componente lineal, SD, estará representada por una línea recta (E-F, figura 4.2), sin embargo, según revela la ecuación 4.5 la componente turbulenta es función del inverso de la distancia y no del logarítmico de la distancia, de donde resulta que la suma de las dos componentes, o sea, el abatimiento total, S_r , quedará representado por una curva (GHI, figura 4.2).

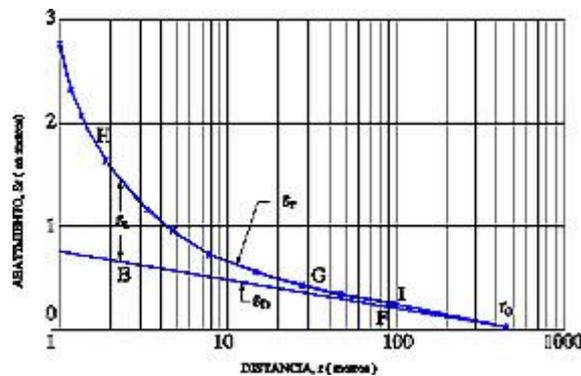


Fig. 4.2
Gráfico de distancia-abatimiento

De lo anterior resulta que el gráfico de distancia-abatimiento no puede utilizarse cuando el flujo es no lineal con los propósitos acostumbrados de determinar TD, E y r_o .

Por otra parte, para conocer si el flujo que ocurre es lineal o no lineal haría falta tener tres pozos de observación situados a diferentes distancias, lo que permitiría reconocer si los tres puntos correspondientes al representarlos en el gráfico de distancia-abatimiento están en línea recta (flujo lineal) o no lo están (flujo no lineal). Como en la mayoría de los casos de lo que se dispone cuando más es de dos pozos de observación, no se tendría la seguridad de si se puede utilizar o no el gráfico de distancia-abatimiento para determinar las propiedades. Como por otra parte, el flujo no lineal puede presentarse en cualquier tipo de acuífero (7), **es preferible no utilizar este tipo de gráfico en el análisis de los resultados de los ensayos de bombeo.**

4.3 USO DE LOS GRAFICOS DE TIEMPO-DISTANCIA-ABATIMIENTO

Los gráficos de tiempo-distancia-abatimiento, se han presentado generalmente en dos formas:

- a) en escala logarítmica
- b) en escala semilogarítmica

En ambos casos, su utilización está restringida a la existencia de flujo lineal hacia el pozo. Los gráficos en escala logarítmica se utilizan para la superposición con curvas tipo con lo que pueden determinarse los valores de TD y E. Los gráficos en escala semilogarítmica presentan el abatimiento en escala aritmética y la cantidad t/r^2 en escala logarítmica en el eje de las abscisas. El análisis de este tipo de gráficos se basa en el hecho de que la componente lineal del abatimiento, o sea, el abatimiento para flujo lineal, (ecuación 4.2) quedará representada por una línea recta.

Sin embargo, cuando el flujo hacia el pozo es no lineal, la representación en un gráfico semilogarítmico de S_r vs $\log(t/r^2)$ no resulta coherente, ya que de acuerdo con la ecuación 3.4 aunque la componente lineal es función de $\log(t/r^2)$, la componente turbulenta varía con r , pero no con t .

De este modo, resulta preferible no utilizar los gráficos de tiempo-distancia-abatimiento en el análisis de los resultados de los ensayos de bombeo.

4.4 USO DE LOS GRAFICOS DE TIEMPO-ABATIMIENTO

Los gráficos de tiempo-abatimiento se presentan generalmente en dos formas:

- a) en escala logarítmica
- b) en escala semilogarítmica

Aunque en algunas ocasiones se han utilizado gráficos de tiempo abatimiento en escala aritmética, ésto no es común y su utilidad es puramente cualitativa.

Los gráficos en escala logarítmica se utilizan superponiéndolos en curvas tipo para determinar las propiedades de los acuíferos, especialmente en el caso de flujo lineal. (3) Sin embargo, para flujo no lineal, dichos gráficos mantendrán la misma forma que para flujo lineal, con la diferencia de que estarán desplazados una cantidad constante en el eje de las ordenadas, ya que en general, para flujo no lineal, el abatimiento estará compuesto para cualquier tipo de acuífero por la suma del abatimiento lineal que corresponda a ese tipo de acuífero, más una cantidad constante que representa el abatimiento turbulento como función de Q^2 .(2)

Los gráficos de tiempo-abatimiento en escala logarítmica permiten por su forma reconocer el tipo de acuífero, según se puede constatar en la figura 4.3 adaptada de Kruseman (3)

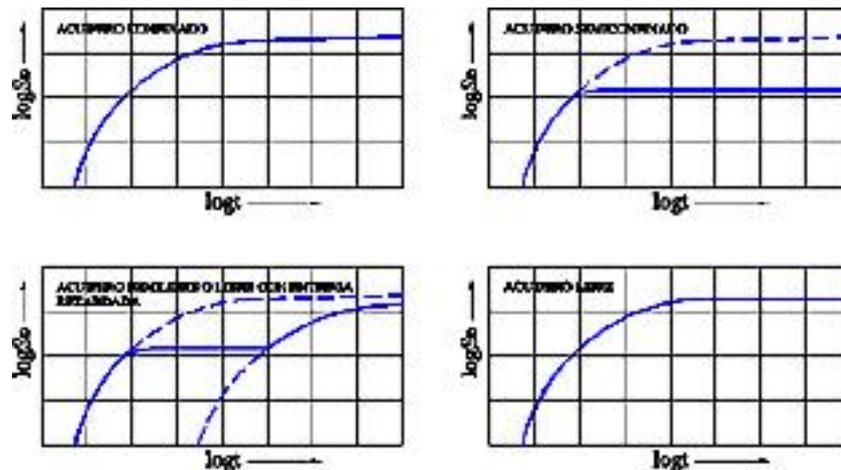


Fig. 4.3
Gráficos de tiempo-abatimiento en escala logarítmica para diferentes clases de acuíferos

Los gráficos de tiempo-abatimiento en escala semilogarítmica se han utilizado en flujo lineal para determinar las propiedades de los acuíferos que es posible determinar cuando ocurre este tipo de flujo, o sea, TD y E. Se han utilizado además para predecir el abatimiento, tanto en el pozo principal como en los de observación o satélites, y para detectar la presencia de fronteras hidrogeológicas más o menos cercanas al pozo de bombeo (recarga), límites geológicos del acuífero, etc.

Para el caso de flujo no lineal, si se toman como punto de partida las ecuaciones 3.4 y 4.1, se verá cómo pueden representarse las componentes SD y ST del abatimiento y por consiguiente su suma, Sr. Un examen de la ecuación 4.2 que representa la componente lineal del abatimiento permite reconocer que en escala semilogarítmica esta ecuación quedará representada por una recta (A-B, figura 4.4).

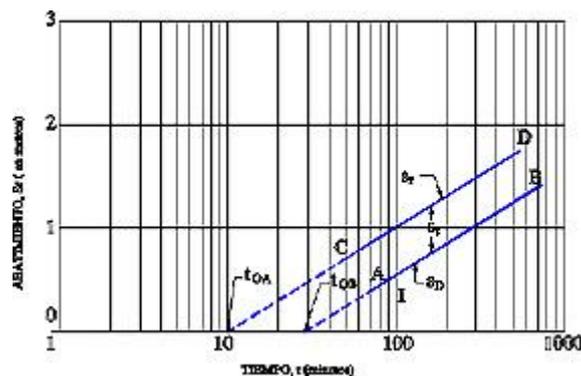


Fig. 4.4
Gráfico de tiempo-abatimiento

La componente turbulenta, ST, puede considerarse constante para cada punto del acuífero (aunque diferente para diferentes puntos) y es independiente del tiempo, o sea que el valor de S_r puede encontrarse sumándole al de SD una constante (ST) y por consiguiente el abatimiento S_r para un punto determinado del acuífero, a través del

tiempo, estará representado por una línea recta (C-D, figura 4.4), paralela a la que representa la componente lineal.

En el caso de flujo no lineal, los gráficos de tiempo-abatimiento pueden seguirse utilizando con los mismos objetivos que cuando el flujo es lineal, excepto en la determinación del coeficiente de almacenamiento, E, por el método acostumbrado, por las razones que se explican a continuación.

La determinación de E, en el caso de flujo lineal, se basa en lo siguiente: (1, 6) La línea recta a la que se han ajustado los datos de la prueba de bombeo, se extiende hasta cortar el eje del tiempo en un punto que se denomina t_0 , sobre la base de que en ese punto el abatimiento será cero se llega a la conclusión que:

$$S_D = 0 = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t_0}{r^2 E} \quad (4.6)$$

de donde:

$$\ln \frac{2,246 T_D t_0}{r^2 E} = 1 \quad (4.7)$$

de modo que:

$$E = \frac{2,246 T_D t_0}{r^2} \quad (4.8)$$

Antes se habrá calculado TD por el procedimiento que se explica más adelante. De ese modo todos los elementos de la ecuación 4.8 son conocidos y podrá calcularse E.

En el caso de flujo no lineal, los datos del ensayo de bombeo se agruparán a lo largo de la línea C-D (figura 4.4), que al extenderla para cortar el eje del tiempo, lo hará en el punto t_0A .

El coeficiente de almacenamiento sólo aparece en la componente lineal, cuya traza en la figura 4.4 es la línea A-B, que prolongada se intersectará con el eje del tiempo en t_0B .

Si para determinar E se utiliza el criterio establecido normalmente y se calcula basándose en el valor de la intersección con el eje del tiempo de la línea recta que representa los datos de la prueba, utilizando como t_0 en la ecuación 4.8 el valor de t_0A , se ve claramente que el valor obtenido para E sería erróneo, ya que t_0A es menor que el que realmente se debía haber utilizado (t_0B). Por consiguiente, el coeficiente de almacenamiento no puede determinarse extendiendo la línea recta ajustada a los resultados del ensayo sin estar totalmente seguros de que el régimen de flujo hacia el pozo es lineal. Posteriormente se analizará el uso de los gráficos semilogarítmicos de tiempo-abatimiento en la interpretación de los ensayos de bombeo y se explicará el método para calcular el coeficiente de almacenamiento.

4.5 TIPO DE GRAFICOS QUE ES PREFERIBLE UTILIZAR EN EL ANALISIS DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO

Del análisis realizado sobre los distintos tipos de gráficos que ha sido costumbre utilizar en la interpretación de los ensayos de bombeo y las limitaciones que se presentan en algunos de ellos se pueden resumir las siguientes conclusiones:

- a) Los gráficos de $Sr\text{-log}(t/r^2)$ no pueden utilizarse cuando el flujo es no lineal.
- b) Cuando el flujo es no lineal, el gráfico semilogarítmico de distancia-abatimiento es una curva y no es posible utilizarlo con los propósitos acostumbrados.
- c) Los gráficos semilogarítmicos de tiempo-abatimiento se pueden utilizar en régimen no lineal con los objetivos acostumbrados con la única advertencia de que hay que determinar el coeficiente de almacenamiento por un procedimiento diferente al usado corrientemente.
- d) Como de los gráficos de tiempo-abatimiento se puede obtener toda la información que se podrá lograr de los otros tipos de gráficos y no están limitados en su uso cuando ocurre flujo no lineal, resulta recomendable basar el análisis gráfico de los resultados de los ensayos de bombeo solamente en procedimientos de tiempo-abatimiento.

4.6 RECONOCIMIENTO DEL TIPO DE ACUIFERO A TRAVES DE LA REPRESENTACION GRAFICA DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO

Como ya se ha dicho, la forma de los gráficos de tiempo-abatimiento en escala doble logarítmica, permite identificar el tipo de acuífero. En la figura 4.3 aparecen las curvas típicas de tiempo-abatimiento para acuíferos confinados, semiconfinados, semilibres o libres con entrega retardada y para acuíferos libres. De ese modo, disponiendo de gráficos logarítmicos los resultados de los ensayos de bombeo, y comparando la forma de la curva que los representa con las formas típicas de la figura 4.3 se podrá reconocer el tipo de acuífero y proceder al análisis de los resultados con las ecuaciones correspondientes.

4.7 IDENTIFICACION DE FRONTERAS HIDROGEOLOGICAS A TRAVES DE LOS GRAFICOS DE TIEMPO-ABATIMIENTO

Como se ha dicho, para un acuífero confinado por ejemplo, la representación de los resultados de un ensayo de bombeo en un gráfico semilogarítmico de tiempo-abatimiento es una línea recta. Como se sabe, el abatimiento aumenta y el cono de depresión se expande a medida que pasa el tiempo. La tendencia del abatimiento queda definida por la línea recta del gráfico, pero si el cono de depresión en su avance alcanza una zona de recarga o una frontera impermeable, quedan modificadas las superposiciones sobre las cuales descansa la extensión indefinida de la línea recta (acuífero de extensión infinita y procedencia del agua extraída sólo del

almacenamiento) y ese cambio aparecerá en el gráfico como un cambio de pendiente, a causa del consecuente aumento o disminución del abatimiento.

En el caso de recarga, el abatimiento disminuirá proporcionalmente a ésta y si es capaz de suministrar el caudal completo de bombeo, el abatimiento quedará estabilizado en el valor correspondiente al momento en que el radio de influencia del pozo en su avance hizo contacto con la recarga (ver figura 4.5).

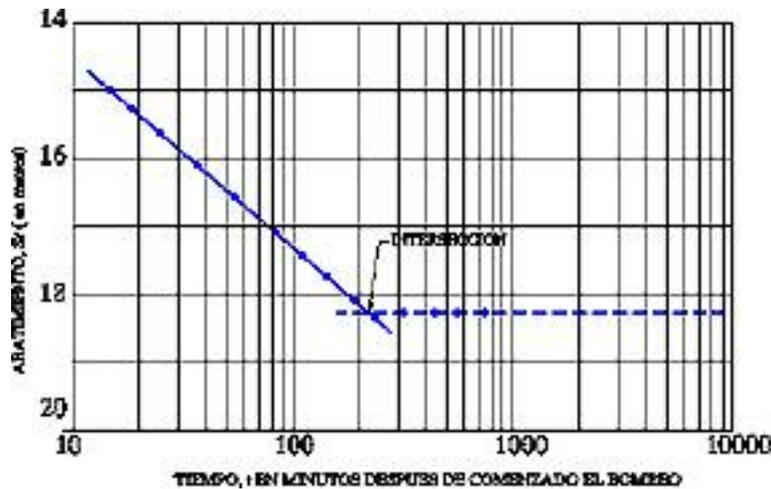


Fig. 4.5

Intersección de la curva , con la zona de recarga

En el caso, por ejemplo, de una frontera impermeable, de modo semejante, cuando el creciente radio de influencia toque la frontera, el abatimiento aumentará a un ritmo superior al que venía aumentando anteriormente (ver figura 4.6)

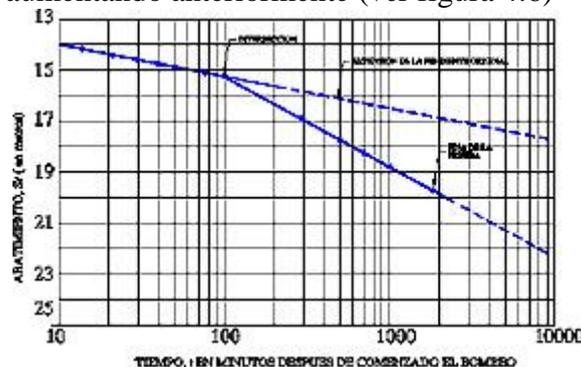


Fig. 4.6

Intersección de la curva , con una frontera impermeable

La localización de la zona de recarga o de la frontera impermeable es muy sencilla. Como se sabe el radio de influencia en un instante determinado, t, está representado por:

(6)

$$r_o = \left(\frac{2,246 T_D t}{E} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.9)$$

Tomando del gráfico de tiempo-abatimiento el valor del tiempo correspondiente al punto en que cambia la pendiente de la recta que representa los resultados del ensayo de bombeo y calculando con ese tiempo, ro por la ecuación 4.9 se obtendrá la distancia a que se encuentra la zona de recarga o la frontera impermeable.

5. INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO

5.1 INTRODUCCION

El primer paso que debe seguirse al proceder a analizar los resultados de un ensayo de bombeo, es disponer la información del ensayo en un gráfico de tiempo-abatimiento en escala doble logarítmica lo que permitirá en muchos casos reconocer el tipo de acuífero. Una vez que se conoce el tipo de acuífero se procederá a determinar sus propiedades utilizando las ecuaciones correspondientes. En general, las propiedades podrán determinarse por procedimientos analíticos o procedimientos gráficos. En lo que sigue, se presenta para cada tipo de acuífero un método de análisis de los diversos que hay para cada caso.

5.2 DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES DE ACUIFEROS CONFINADOS Y LIBRES POR ENSAYOS A CAUDAL CONSTANTE

Procedimiento analítico

Con pruebas a caudal constante, para poder determinar todas las propiedades del acuífero, es necesario tener información al menos de dos pozos de observación situados a distancias diferentes del centro del pozo de bombeo (4). Uno de los procedimientos que puede seguirse (6) es la determinación de TD, TT y E en ese orden.

Para determinar TD se parte de la ecuación 3.4, aplicada a cada pozo de observación para dos tiempos diferentes t_A y t_B ($t_B > t_A > 50$ min) o sea que, si se tienen dos pozos de observación resultará: para t_A en el pozo de observación #1.

$$S_{r1A} = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t_A}{r_1^2 E} + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2} \cdot \left(\frac{r_o - r_1}{r_1 r_o} \right) \quad (5.1)$$

para t_B en el pozo de observación #1

$$S_{r1B} = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t_B}{r_1^2 E} + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2} \cdot \left(\frac{r_o - r_1}{r_1 r_o} \right) \quad (5.2)$$

de donde:

$$S_{r1B} - S_{r1A} = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{t_B}{t_A} \quad (5.3)$$

Haciendo el mismo análisis para el pozo de observación #2, resulta:

$$S_{r_{2B}} - S_{r_{2A}} = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{t_B}{t_A} \quad (5.4)$$

de modo que:

$$T_D = \frac{Q}{4\pi(S_{r_{1B}} - S_{r_{1A}})} \ln \frac{t_B}{t_A} \quad (5.5)$$

y también:

$$T_D = \frac{Q}{4\pi(S_{r_{2B}} - S_{r_{2A}})} \ln \frac{t_B}{t_A} \quad (5.6)$$

Es bueno aclarar que para el tiempo t_B debe seleccionarse el mayor posible en que se tenga la seguridad de que el flujo hacia el pozo no ha llegado al equilibrio.

Los valores de T_D para ambos pozos de observación se promedian, aunque si son muy diferentes, el resto de las propiedades que se calcularán tendrán una representatividad menor que si los valores obtenidos para T_D son muy parecidos.

Una vez determinada T_D , para calcular TT , se aplica la ecuación 3.4 a los datos de dos pozos de observación, para un mismo tiempo t_c . Así se tendrá que:

$$S_{r_{1c}} = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t_c}{r_1^2 E} + \frac{Q^2 (r_o - r_1)}{4\pi^2 T_T^2 (r_1 r_o)} \quad (5.7)$$

$$S_{r_{2c}} = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t_c}{r_2^2 E} + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2} \cdot \frac{(r_o - r_2)}{(r_2 r_o)} \quad (5.8)$$

Como el abatimiento en el pozo más cercano para un tiempo determinado es mayor que el abatimiento en el pozo más alejado para el mismo tiempo, restando la ecuación 5.7 de la 5.8 se obtiene:

$$S_{r_{1c}} - S_{r_{2c}} = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2} \cdot \frac{(r_2 - r_1)}{(r_1 r_2)} \quad (5.9)$$

En la ecuación 5.9 todos los datos son conocidos excepto TT . Luego, despejándola se puede calcular sin dificultad.

Para calcular E, conocidos TD y TT, se usa la ecuación 3.4 para un tiempo mayor que 50 minutos y lo mayor posible en cualquiera de los pozos de observación. Si se observa la ecuación 3.4, o sea:

$$S_r = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t}{r^2 E} + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2} \cdot \frac{(r_o - r)}{r r_o} \quad (3.4)$$

se verá que en esta fase del proceso de análisis, si se le supone al radio de influencia un valor razonable, el único valor desconocido será el del coeficiente de almacenamiento, que podrá calcularse sin dificultad a partir de la ecuación 3.4. Una vez obtenido este valor aproximado de E, se calculará el valor del radio de influencia correspondiente al tiempo con que se calculó E, utilizando la ecuación 4.9, o sea:

$$r_o = \left(\frac{2,246 T_D t}{E} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.9)$$

Si el valor calculado para r_o por esta ecuación coincide con el que se supuso para calcular inicialmente E, el valor obtenido para E será el correcto, si no coincide, se volverá a calcular E con el nuevo radio de influencia, iterando hasta que exista aproximación suficiente.

De ese modo quedan determinados los parámetros TD, TT y E, de los cuales pueden obtenerse KD y KT ó k y C, utilizando las ecuaciones de transformación correspondientes.

Procedimiento gráfico

Para determinar las propiedades de un acuífero confinado utilizando el procedimiento gráfico, se representan en un gráfico semilogarítmico de tiempo-abatimiento los resultados del ensayo de bombeo en cada pozo de observación tal como aparece en la figura 5.1 para dos de ellos:

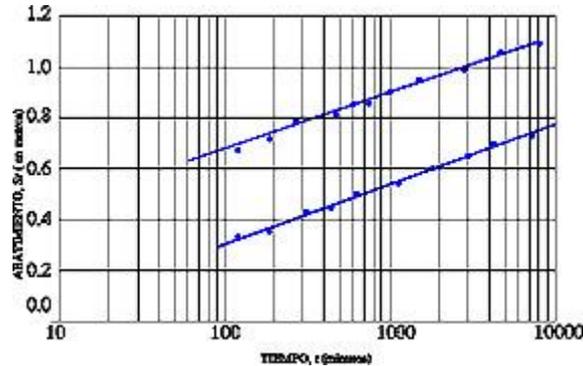


Fig. 5.1

Gráfico semilogarítmico de los resultados de un ensayo de bombeo

Se trazarán las rectas de mejor ajuste para cada pozo y de su pendiente se determinará el valor de TD, teniendo en cuenta lo expresado por la ecuación 5.3 ó la 5.4 que la

diferencia en abatimiento para dos tiempos diferentes en uno cualquiera de los pozos de observación es:

$$S_{rB} - S_{rA} = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{t_B}{t_A} \quad (5.10)$$

que expresada en logaritmos de base 10 se transforma en:

$$S_{rB} - S_{rA} = \frac{2,3026Q}{4\pi T_D} \log \frac{t_B}{t_A} = 0,1832 \frac{Q}{T_D} \log \frac{t_B}{t_A} \quad (5.11)$$

Si se designa por ΔS la diferencia en abatimiento por ciclo logarítmico del tiempo, ocurrirá que para cada ciclo logarítmico $t_B = 10 t_A$, de modo que la ecuación 5.11 se transformará en:

$$\Delta S = 0,1832 \frac{Q}{T_D} \log \frac{10t_A}{t_A} = 0,1832 \frac{Q}{T_D} \log 10 \quad (5.12)$$

luego:

$$T_D = 0,1832 \frac{Q}{\Delta S} \quad (5.13)$$

El valor de T_D se calculará para cada recta que represente los resultados del ensayo en un pozo de observación y se promediará.

Para determinar T_T se buscará en el gráfico, (figura 5.1) la diferencia media en abatimiento entre dos pozos de observación ($S_{r1} - S_{r2}$), que tal como lo expresa la ecuación 5.9 resulta:

$$S_{r1c} - S_{r2c} = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2} \cdot \frac{(r_2 - r_1)}{(r_1 r_2)} \quad (5.9)$$

de la cual puede calcularse T_T , ya que es la única incógnita en esa ecuación.

Para calcular E , se calcula el valor de la componente turbulenta del abatimiento para el pozo de observación más cercano al pozo de bombeo, que de acuerdo con la ecuación

3.5 tiene el valor aproximado de:

$$S_T = \frac{Q^2}{4\pi^2 T_r^2} \cdot \frac{1}{r} \quad (5.14)$$

y se resta de la recta que representa S_r -log t, con lo que quedará una recta que corresponderá al valor de la componente lineal del abatimiento para ese pozo de observación, o sea:

$$S_D = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t}{r^2 E} \quad (5.15)$$

que expresada en logaritmos de base 10 resulta:

$$S_D = \frac{2,3026 Q}{4\pi T_D} \log \frac{2,246 T_D t}{r^2 E} = 0,1832 \frac{Q}{T_D} \log \frac{2,246 T_D t}{r^2 E} \quad (5.16)$$

Si se extiende la recta que representa la componente lineal S_D hasta cortar el eje del tiempo en t_{oB} , para ese tiempo $S_D = 0$ y por consiguiente resultará que:

$$\frac{2,246 T_D t_{oB}}{r^2 E} = 1 \quad (5.17)$$

De donde resulta que:

$$E = \frac{2,246 T_D t_{oB}}{r^2} \quad (5.18)$$

ecuación que permite calcular E.

5.3 EJEMPLOS ILUSTRATIVOS DE DETERMINACION DE PROPIEDADES DE ACUIFEROS CONFINADOS Y LIBRES CON PRUEBAS A CAUDAL CONSTANTE

EJEMPLO No. 1

En la tabla 5.1 aparecen los resultados de un ensayo de bombeo tomados de Kruseman. [\(2\)](#)

Estos resultados aparecen representados en el gráfico doble logarítmico de la figura 5.2. Las características del gráfico indican que se trata de un acuífero confinado o libre. El

análisis de los resultados indicará que tipo de acuífero es. Dicho análisis se hará primero por el procedimiento analítico y después por el procedimiento gráfico.

Fig. 5.2
Gráfico doble logarítmico del ensayo en el piezómetro H30

TABLA 5.1

PRUEBA DE BOMBEO EN "OUDE KORENDIJK" (2)(Q=788 m ³ /día)					
PIEZOMETRO H30 (r1=30 m)					
t(min.)	Sr(m)	t(min.)	Sr(m)	t(min.)	Sr(m)
0	0	5,35	0,50	80	0,855
0,1	0,04	6,80	0,54	95	0,873
0,25	0,08	8,3	0,57	139	0,915
0,50	0,13	8,7	0,58	181	0,935
0,70	0,18	10,0	0,60	245	0,966
1,0	0,23	13,1	0,64	300	0,990
1,40	0,28	18	0,680	360	1,007
1,90	0,33	27	0,742	480	1,050
2,33	0,36	33	0,753	600	1,053
2,80	0,39	41	0,779	728	1,072
3,36	0,42	48	0,793	830	1,088
4,00	0,45	59	0,819		
PIEZOMETRO H90 (r2=90 m)					
t(min.)	Sr(m)	t(min.)	Sr(m)	t(min.)	Sr(m)
0	0	9	0,206	120	0,528
1,5	0,015	13	0,250	150	0,550
2,0	0,021	15	0,275	180	0,569
2,16	0,023	18	0,305	248	0,593
2,66	0,044	25	0,348	301	0,614
3	0,054	30	0,364	363	0,636
3,5	0,075	40	0,404	422	0,657
4	0,090	53	0,429	542	0,679
4,33	0,104	60	0,444	602	0,688
5,5	0,133	75	0,467	680	0,701
6	0,153	90	0,494	785	0,718
7,5	0,178	105	0,507	845	0,716

La prueba de bombeo se realizó con un caudal constante de 788 m³/día.

Procedimiento analítico

Cálculo de TD

De acuerdo con las ecuaciones 5.5 y 5.6

$$T_D = \frac{Q}{4\pi(S_{r1B} - S_{r1A})} \ln \frac{t_B}{t_A} \quad (5.5)$$

Tomando de la tabla 5.1 datos del piezómetro H30, para t_A = 80 min y t_B = 600 min se tendrá que: S_{rA} = 0,855m y S_{rB} = 1,053m.

Luego:

$$T_D = \frac{Q}{4\pi(S_{r2B} - S_{r2A})} \ln \frac{t_B}{t_A} \quad (5.6)$$

T_D = 638,12 m²/día (piezómetro H30)

Tomando de la tabla 5.1 datos del piezómetro H90 para t_A = 90 min y t_B = 422 min, se tendrá: S_{rA} = 0,494 m y S_{rB} = 0,657 m. Luego

$$T_D = \frac{788}{4\pi(0,657 - 0,494)} \ln \frac{422/1440}{90/1440}$$

T_D = 594,45 m²/día (piezómetro H90)

$$T_{D\text{promedio}} = \frac{638,12 + 594,45}{2} = 616,28 \text{ m}^2 / \text{día}$$

Cálculo de TT

De acuerdo con la ecuación 5.9 la diferencia en abatimiento entre dos pozos de observación para un mismo tiempo está expresada por:

$$S_{r1c} - S_{r2c} = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2} \cdot \frac{(r_2 - r_1)}{(r_1 r_2)} \quad (5.9)$$

Como no hay observaciones en los dos pozos de tiempos mayores de 50 minutos que sean para exactamente el mismo tiempo, se tomarán las correspondientes al tiempo

t=181 min para el piezómetro H30(Sr1 = 0,935 m) y al tiempo t=180 min para el piezómetro H90(Sr2=0,569), de modo que Sr1-Sr2=0,366 m y se tendrá:

$$0,366 = \frac{788}{4\pi 616,28} \ln\left(\frac{90}{30}\right)^2 + \frac{(788)^2(90-30)}{4\pi^2 T_r^2 30.90}$$

$$0,366 - 0,224 = 0,142 = \frac{349,53}{T_r^2}$$

$$T_r = \left(\frac{349,53}{0,142}\right)^{\frac{1}{2}} = 49,61 \text{ m}^2 / \text{día}$$

Cálculo de E

Se sabe que la ecuación 3.4 está expresada por:

$$S_r = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t}{r^2 E} + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_r^2} \cdot \frac{(r_o - r)}{r r_o} \quad (3.4)$$

Si se supone un valor de ro=1000 m para el radio de influencia del pozo y se aplica la ecuación para el piezómetro H30 con el abatimiento Sr=1,053 m para t=600 min, resultará:

$$1,053 = \frac{788}{4\pi \cdot 616,28} \ln \frac{2,246 \cdot 616,28 \cdot 600 / 1440}{(30)^2 E} + \frac{(788)^2 (1000 - 30)}{4\pi^2 (49,61)^2 \cdot 30 \cdot 1000}$$

$$1,053 - 0,207 = 0,846 = 0,10175 \ln \frac{0,6408}{E}$$

luego: $E = 1,57 \cdot 10^{-4}$

para ese valor de E y t=600 min de acuerdo con la ecuación 4.9

$$r_o = \left(\frac{2,246 T_D t}{E}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.9)$$

ro=1916,6 m

Suponiendo como nuevo valor de ro=1910 m aplicando la ecuación 3.4 para el piezómetro H30 con tiempo de 600 minutos se tendrá:

$$1,053 = \frac{788}{4\pi \cdot 616,28} \ln \frac{2,246.616,28.600/1440}{(30)^2 E} + \frac{(788)^2 (1910 - 30)}{4\pi^2 (49,61)^2 30.1910}$$

$$1,053 - 0,210 = 0,843 = 1,01751n \frac{0,6408}{E}$$

$$\text{luego } E = 1,62 \cdot 10^{-4}$$

recalculando el valor de r_o para este valor de E y $t=600$ minutos se tiene:

$$r_o = \left(\frac{2,246.616,28.600/1440}{1,62 \cdot 10^{-4}} \right)^{\frac{1}{2}} = 1886 m$$

que es lo suficientemente cercano al valor de 1910 supuesto, luego

$$E = 1,62 \cdot 10^{-4}$$

que corresponde a un acuífero confinado.

Los valores obtenidos para las propiedades utilizando el procedimiento analítico son:

$$TD = 616,28 m^2/dia$$

$$TT = 49,61 m^2/dia$$

$$E = 1,62 \cdot 10^{-4}$$

Procedimiento gráfico

En la figura 5.3 aparecen representados en un gráfico semilogarítmico de distancia-abatimiento los resultados del ensayo de bombeo que se registran en la tabla 5.1, para los piezómetros H30 y H90, habiéndose trazado las rectas de mejor ajuste correspondientes.

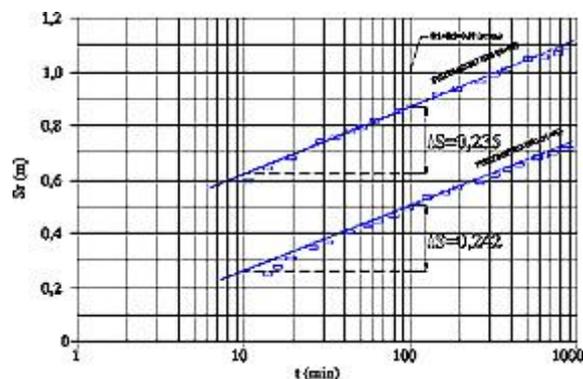


Fig. 5.3
Representación gráfica de los resultados del ensayo de bombeo
registrados en la tabla 5.1

Cálculo de TD

Observando dicha figura, se ve que para el piezómetro H30, $\Delta S=0,235$ m y que para el piezómetro H90, $\Delta S=0,242$ m. Luego, la diferencia promedio de abatimiento por ciclo logarítmico será:

$$\Delta S = \frac{0,235 + 0,242}{2} = 0,2385 \text{ m}$$

Luego de acuerdo con la ecuación 5.13

$$T_D = 0,1832 \frac{Q}{\Delta S} = 0,1832 \frac{788}{0,2385} = 605,29 \text{ m}^2 / \text{día}$$

Cálculo de TT

Observando el gráfico de la figura 5.3 se verá que la diferencia promedio de abatimiento entre los piezómetros H30 y H90 es de 0,37 m.

Aplicando la ecuación 5.9 que expresa la diferencia en abatimiento $Sr1-Sr2$, resulta:

$$0,37 = \frac{788}{4\pi \cdot 605,29} 1n\left(\frac{90}{30}\right)^2 + \frac{(788)^2 (90-30)}{4\pi^2 T_r^2 \cdot 30 \cdot 90}$$

$$0,37 - 0,228 = 0,142 = \frac{349,53}{T_r^2}$$

$$T_r = \left(\frac{349,53}{0,142}\right)^{\frac{1}{2}} = 49,61 \text{ m}^2 / \text{día}$$

Cálculo de E

Como se ha dicho, se calcula primero la componente turbulenta del abatimiento, ST, por la ecuación 5.14 para el piezómetro H30, o sea:

Este valor se resta de la recta que representa $Sr-\log t$ para el piezómetro H30, tal como aparece en la figura 5.4 y se obtiene la recta que representa la componente lineal del abatimiento SD.

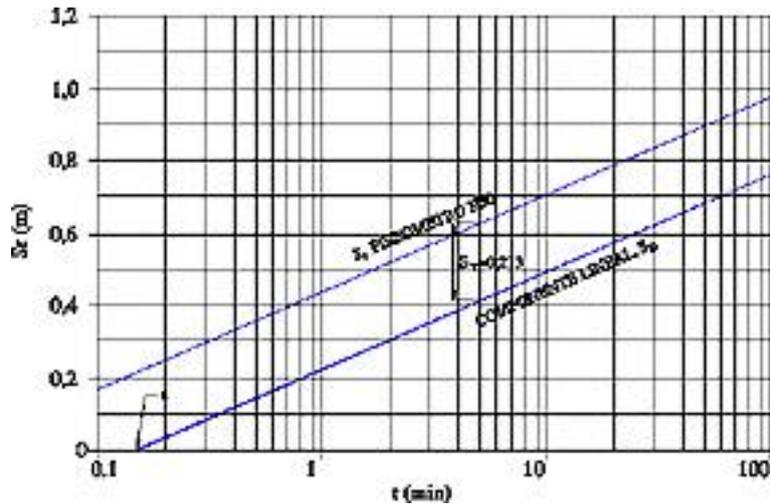


Fig. 5.4

Al extender la recta que representa SD hasta cortar el eje log t se obtiene el valor de $t_{0B}=0,16$ min. y aplicando la ecuación 5.18 resultará:

$$E = \frac{2,246 T_D t_{0B}}{r^2} = \frac{2,246 \cdot 605,29 \cdot 0,16}{1440(30)^2} = 1,68 \cdot 10^{-4}$$

En resumen, las propiedades hidrogeológicas calculadas por el procedimiento gráfico resultan:

$$TD=605,29 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$TT=49,61 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$E=1,68 \cdot 10^{-4}$$

Como puede observarse, la diferencia entre los resultados obtenidos por ambos procedimientos no es significativa. El procedimiento gráfico tiene la ventaja de que se trabaja con la recta de mejor ajuste que representa S_r -log t y no con dos puntos que pudieran estar desviados de la posición de dicha recta. Sin embargo la prolongación de la recta que representa SD hasta alcanzar el punto t_{0B} , ofrece dificultades que le quitan precisión al cálculo de E. Es por eso, que lo aconsejable es utilizar una combinación de ambos procedimientos, apelando al método gráfico para calcular TD y la diferencia de abatimiento entre dos satélites y usando el método analítico en el resto de los cálculos, como se verá al resolver el ejemplo No. 2.