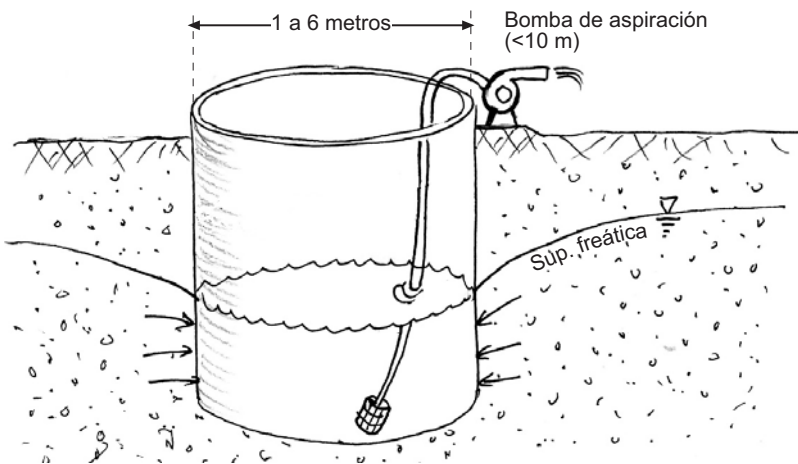


Hidráulica de captaciones: Fundamentos

Tipos de captaciones

Para extraer agua del terreno se utilizan diversos tipos de captaciones, reseñamos brevemente los más utilizados:

Pozos excavados



Es el tipo de captación más antiguo y más elemental. En la actualidad se excava con máquinas y en rocas duras con explosivos, aunque en muchos países continúan realizándose manualmente. Generalmente, el agua entra en el pozo por el fondo y las paredes, a través de los huecos que se dejan entre las piedras o ladrillos.

Sigue siendo la elección más adecuada para explotar acuíferos superficiales, pues su rendimiento es superior al de un sondeo de la misma profundidad. Otra ventaja en los acuíferos pobres es el volumen de agua almacenado en el propio pozo.

Diámetro= 1 a 6 metros o más. Profundidad= generalmente 5 a 20 metros.

Sondeos

Son las captaciones más utilizadas en la actualidad. Los diámetros oscilan entre 20 y 60 cm. y la profundidad en la mayoría de los casos entre 30 m y 300 o más. Se instala tubería ranurada ("rejilla" o "filtro") sólo frente a los niveles acuíferos, el resto, tubería ciega.

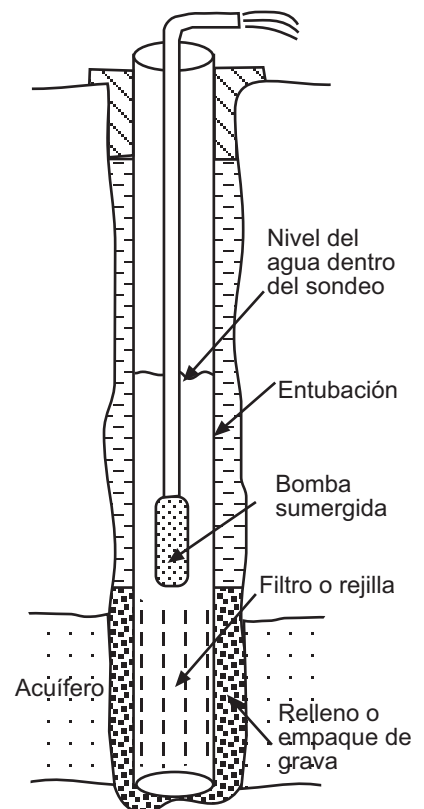
Las **técnicas de perforación** son variadas:

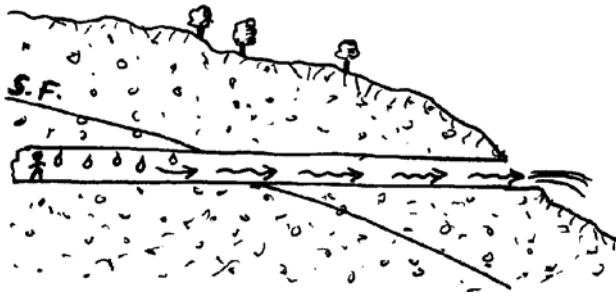


La **percusión** es la más sencilla (cable y trépano que golpea) y es lenta pero efectiva para profundidades moderadas (<150 m) y en ciertas rocas. En la **rotación** un *tricono* (en la imagen) tritura la roca, extrayéndose los detritus mediante la circulación de agua. La adición de lodos a este agua puede taponar los niveles acuíferos atravesados.

La **rotopercusión** puede avanzar en rocas muy duras a gran velocidad.

Se denomina **desarrollo** a los trabajos posteriores a la perforación para aumentar el rendimiento de la captación: extrayendo la fracción más fina en materiales detríticos, limpiando restos de lodos de perforación o disolviendo la roca con ácido en calizas.





Galerías

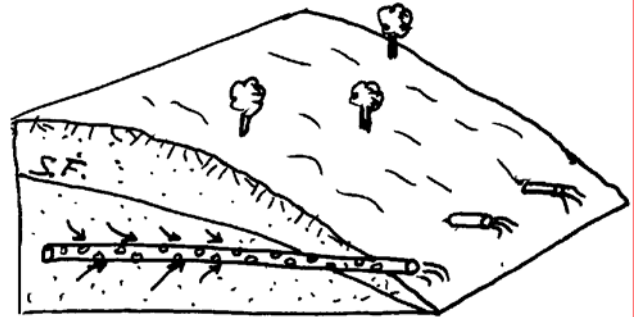
Ya existían galerías para agua en Mesopotamia en el siglo IV a. C. Con una ligera pendiente, el agua sale al exterior por gravedad, sin bombeo.

Se excavan igual que en minería. En Canarias es la captación más frecuente, generalmente con varios km de longitud.

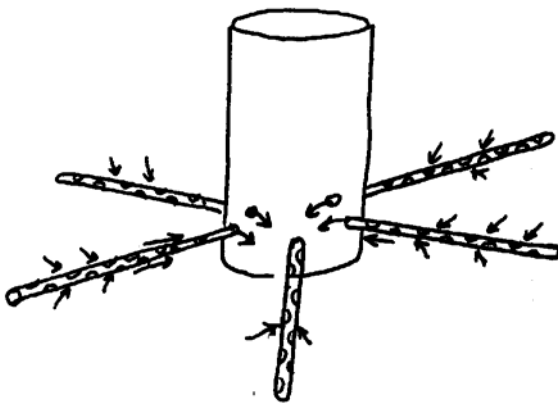
Drenes

Similares a las galerías, pero son tubos de pequeño diámetro, perforados con máquina, normalmente hasta unas decenas de metros.

Son más utilizados para estabilidad de laderas que para la utilización del agua.



Pozos excavados con drenes radiales



Se utilizan en los mismos casos que los excavados pero con mayor rendimiento. Generalmente en buenos acuíferos superficiales cuando se requieren grandes caudales. Su radio equivalente puede evaluarse mediante la siguiente fórmula (CUSTODIO, 1983, p.1823):

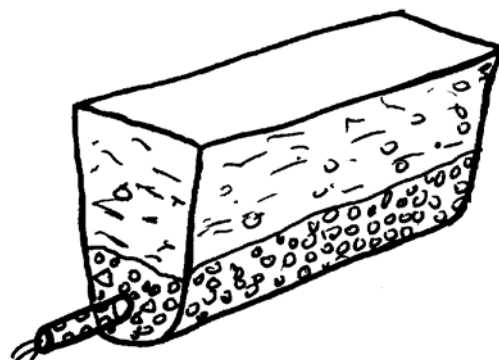
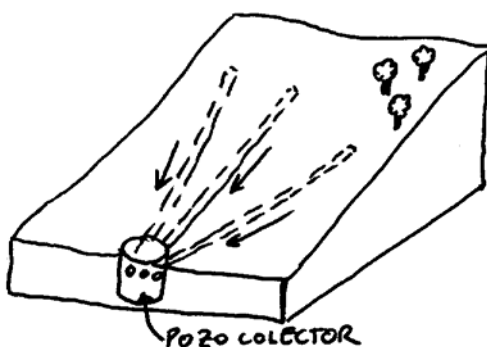
$$r_e = 0,8 L_m (0,25)^{1/n}$$

r_e = Radio equivalente

L_m = Longitud media de los drenes

n = Número de drenes

Zanjas de drenaje



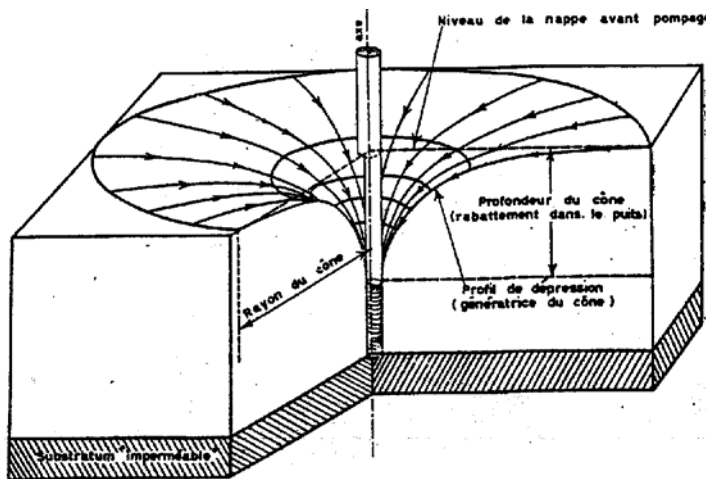
En acuíferos superficiales, para drenar los primeros metros. Profundidad de 2 a 4 metros y longitudes de unas decenas a varios centenares de metros. Se excavan una o varias zanjas, que, siguiendo la pendiente topográfica, vierten a un pozo colector desde el que se bombea.

Se utilizan tanto para explotación del agua subterránea poco profunda como para el drenaje necesario para la estabilidad de obras.

Cono de descensos

Vamos a centrarnos en el comportamiento del agua subterránea cuando se bombea en un sondeo vertical. Zanjas, drenes, etc. requieren un tratamiento específico.

Supongamos que empezamos a bombear en un acuífero libre cuya superficie freática inicial fuera horizontal. El agua comienza a fluir radialmente hacia el sondeo, y, transcurrido un tiempo,



por ejemplo unas horas, la superficie freática habría adquirido la forma que se presenta en la figura 2¹, denominada **cono de descensos**. Esto puede apreciarse realmente si en los alrededores del sondeo que bombea existen otros sondeos para observación de los niveles. La forma del cono es convexa ya que el flujo necesita un gradiente cada vez mayor para circular por secciones cada vez menores.

En un acuífero libre, es la superficie freática la que toma la forma del cono de descensos. En cambio, si lo que se bombea es un acuífero confinado o semiconfinado, al iniciar el bombeo es dicha superficie la que forma el cono de

Figura 2.- Cono de descensos alrededor de un sondeo bombeando (MARGAT, 1962)

descensos.(Fig.3). En ambos casos hemos supuesto que la superficie freática o piezométrica inicial es horizontal, aunque no siempre es así.

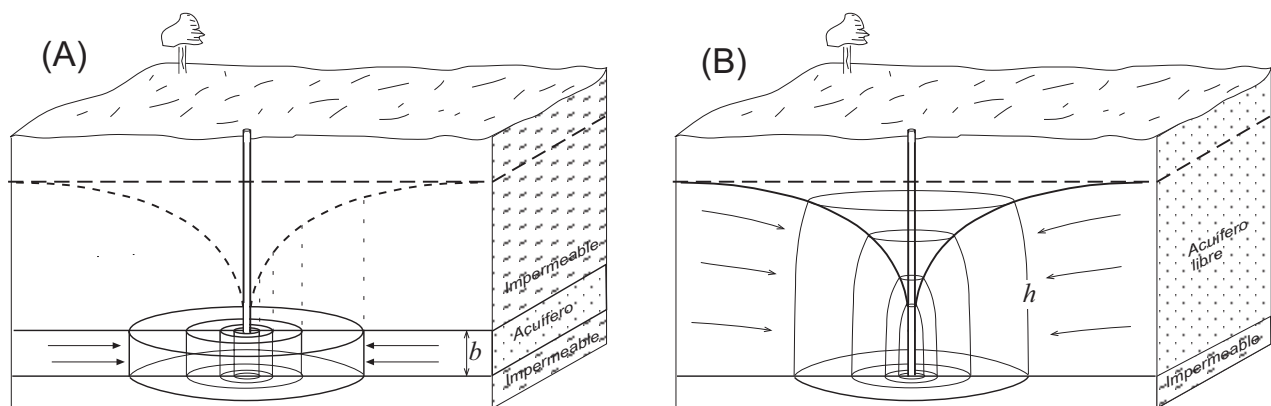


Figura 3.- (A) Cono de descensos y superficies equipotenciales en un acuífero **confinado**. (B) Idem. en un acuífero **libre**.

En ambos casos, libre y confinado, el agua circula radialmente hacia el sondeo.

En el confinado el flujo es horizontal en el interior del acuífero (espesor b de la figura 3A) y el cono de descensos es una superficie virtual que está por encima del acuífero. A medida que el agua se acerca al sondeo debe atravesar secciones de menor radio; el espesor b del acuífero se mantiene constante. Estos cilindros concéntricos representan también las **superficies equipotenciales**, cuya pérdida progresiva de energía queda reflejada en el cono formado por la superficie piezométrica.

En el acuífero libre el agua circula solamente por la parte saturada del acuífero (espesor h de la figura 3B), desde el cono hacia abajo. A medida que el agua se acerca al sondeo debe atravesar

¹ Margat, J. (1964).- *Notions générales sur l'hydraulique des puits*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Paris.

secciones de menor radio y también de menor altura. Además, las superficies equipotenciales no son exactamente cilindros, ya que el flujo no es perfectamente horizontal.

Régimen permanente y variable

A medida que pasa el tiempo, el cono de descensos va aumentando tanto en profundidad como en extensión. Estamos en régimen variable. Si en un sondeo de observación próximo al que bombea hemos medido los descensos en varios tiempos sucesivos, observamos que la variación del nivel en ese punto (figura 4a) es más rápida en los primeros momentos, y progresivamente la velocidad del descenso se va ralentizando.

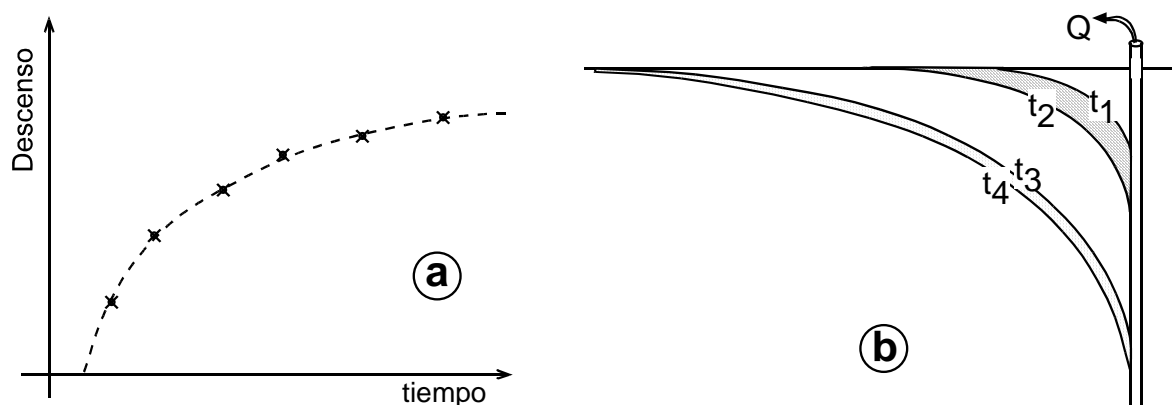


Figura 4. (a) Descenso en un sondeo de observación en función del tiempo. (b) Las franjas entre $t_1 - t_2$ y $t_3 - t_4$ han sido producidas en idénticos incrementos de tiempo y presentan en el dibujo la misma superficie (en la realidad, el mismo volumen). Por éso los descensos son cada vez menores.

Esto es debido a que cuando el cono es mayor, para liberar el mismo volumen de agua necesita un descenso menor: en la figura 4b, entre t_1 y t_2 ha transcurrido el mismo tiempo que entre t_3 y t_4 ; si el caudal de bombeo es constante, el volumen de agua liberado en ambos incrementos de tiempo es el mismo, pero el descenso entre t_3 y t_4 es menor. En otras palabras: el área rayada comprendida entre t_1 y t_2 es la misma que entre t_3 y t_4 . Sin embargo, el espesor de la franja entre t_3 y t_4 (descenso generado) es mucho menor.

Las franjas marcadas en la fig 4b en un acuífero libre se han vaciado de agua, mientras que si se trata del cono de un confinado reflejan una disminución del potencial hidráulico, que multiplicada por el coeficiente de almacenamiento indica el volumen de agua liberado.

Si el acuífero no recibe alimentación, el descenso continuaría y el cono aumentaría sin detenerse. En condiciones naturales, el cono de descensos puede tomar agua de un río, un lago o de otro acuífero. Si esto sucede, los descensos se estabilizan, alcanzándose el régimen permanente o de equilibrio (Figura 5). En estas condiciones, la forma y tamaño del cono se mantienen aunque el sondeo siga bombeando inintermitentemente.

En la realidad, en muchas ocasiones se produce un régimen quasi-permanente, en el que aparentemente no hay variación con el tiempo, pero en un intervalo de tiempo largo, de varios días, puede llegar a apreciarse un descenso de unos pocos centímetros.

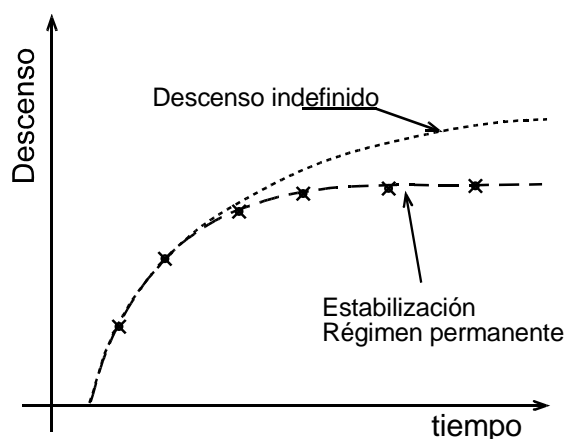


Figura 5.- Estabilización de los descensos después de un cierto tiempo de bombeo.

Fórmulas que expresan la forma del cono de descensos

Desde mediados del siglo XIX se intentó encontrar expresiones matemáticas que reflejaran la forma y evolución del cono de descensos. Es evidente la utilidad de estas expresiones en la práctica: podremos evaluar la influencia que tendrá un bombeo en puntos vecinos; si el radio de nuestro bombeo podría llegar a una zona determinada en la que se infiltra agua contaminada, o calcular si será preferible extraer el caudal necesario mediante un solo sondeo de mayor caudal o con varios de menor caudal, etc.

Observamos en la figura 6 que la ecuación del cono ha de ser del tipo $s=f(1/r)$ [s =descenso, r =distancia], ya que a mayor distancia, menor descenso. Será función del caudal (Q): si bombeamos un mayor caudal generaremos un cono mayor. Y en régimen variable, será además función del tiempo.

En ambos casos, variable o permanente, será función del acuífero: mejor acuífero, menores descensos. Pero existe una diferencia fundamental: **en régimen**

permanente, el acuífero ya no aporta agua por vaciado de poros (libre) o por descompresión (confinado), sino que **solamente transmite el agua** radialmente hacia el sondeo que bombea. Por tanto, si se trata o no de un “buen acuífero” en régimen permanente dependerá de la transmisividad (T), mientras que en régimen variable dependerá de la transmisividad y del Coeficiente de Almacenamiento (S), que en un acuífero libre corresponde a la porosidad eficaz (m_e).

En resumen, las fórmulas que reflejen la forma del cono han de depender de las siguientes variables:

$$\text{Régimen permanente: } s = f\left(\frac{1}{r}, Q, \frac{1}{T}\right) ; \quad \text{Régimen variable: } s = f\left(\frac{1}{r}, t, Q, \frac{1}{T}, \frac{1}{S}\right)$$

Formas del cono según las características del acuífero

Si el acuífero tiene un mayor coeficiente de almacenamiento (S) o porosidad eficaz (m_e), los descensos serían menores, ya que el acuífero proporciona más agua, y por tanto el tamaño del cono sería menor (Figura 7.a)

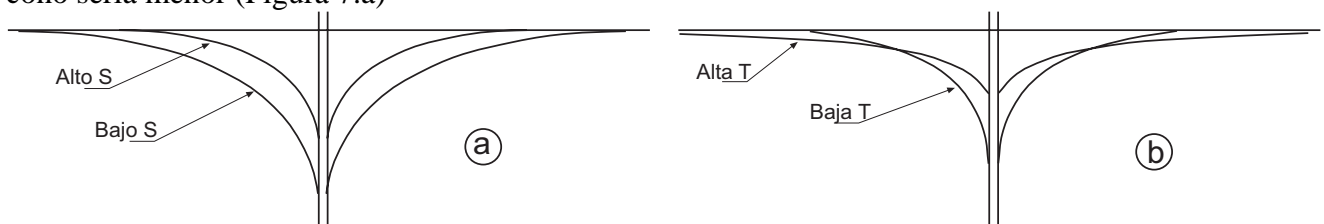


Figura 7.- (a) A igual Transmisividad, el cono es mayor cuanto más bajo es el Coeficiente de Almacenamiento (o m_e). (b) A igual Coeficiente de Almacenamiento (o m_e), la pendiente del cono aumenta cuanto más baja es la Transmisividad

Análogamente, manteniéndose constante el S , si el acuífero tiene una menor transmisividad (T),

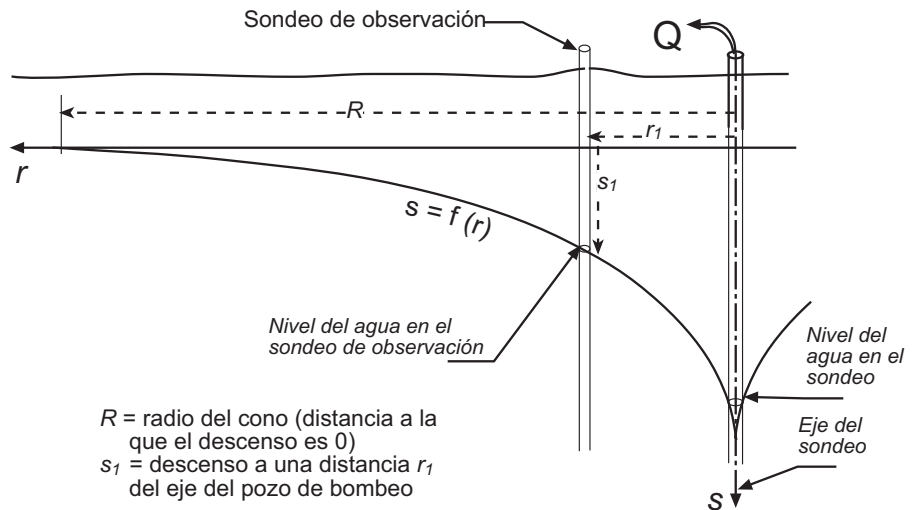


Figura 6.- Corte del cono de descensos. La generatriz del cono corresponde a la ecuación $s=f(r)$

la pendiente necesaria para que el agua circule será mayor (de nuevo recordamos Darcy: si disminuye la K y/o la sección de paso, para que el caudal circulante sea el mismo debe aumentar el otro factor: el gradiente hidráulico) (Figura 7.b)

Supuestos Básicos

Las fórmulas más sencillas que nos expresan la forma del cono de descensos se refieren al caso más simple posible que reúne las siguientes características:

- Acuífero confinado perfecto
- Acuífero de espesor constante, isótropo y homogéneo
- Acuífero infinito
- Superficie piezométrica inicial horizontal (=sin flujo natural)
- Caudal de bombeo constante
- Sondeo vertical, con diámetro infinitamente pequeño (=agua almacenada en su interior despreciable)
- Captación "completa" (= que atravesase el acuífero en todo su espesor)

Posteriormente, las formulaciones básicas, válidas para esas condiciones ideales, se van complicando para adaptarse al incumplimiento de una u otra de las condiciones referidas: acuífero semiconfinado o libre, acuífero que se termina lateralmente por un plano impermeable, bombeo variable, etc.

Régimen permanente

Vamos a deducir la ecuación que expresa la forma del cono de descensos en régimen permanente y en un acuífero confinado.

En la Figura 8 se representa el cono de descensos generado por el flujo radial del agua hacia un sondeo, a través de un **acuífero confinado**, de espesor constante.

Al estar en régimen permanente, el caudal (Q) que estamos extrayendo es el mismo que, fluyendo radialmente hacia el sondeo, está atravesando cualquier cilindro concéntrico con el sondeo (Figura 8).

Aplicamos la ley de Darcy al flujo del agua subterránea a través de una de esas secciones cilíndricas, de radio r medido desde el eje del sondeo:

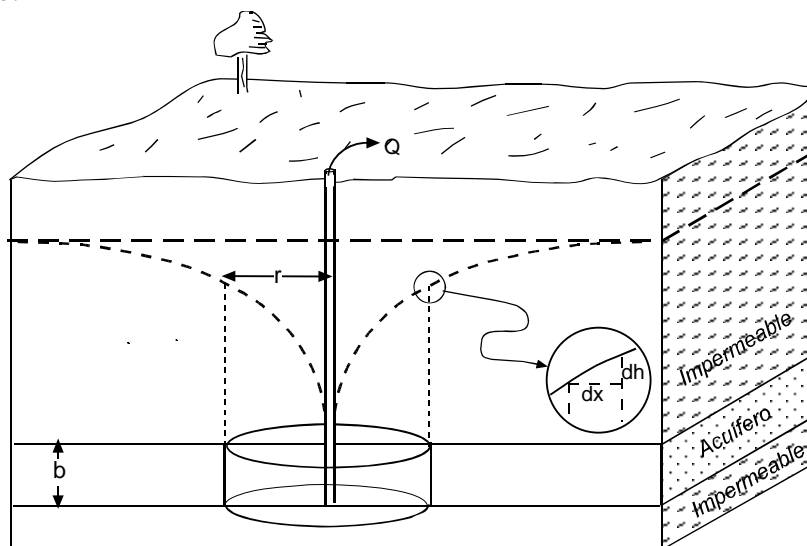


Figura 8. Acuífero confinado en régimen permanente

$$Q = K \cdot A \cdot i$$

donde:

Q = caudal que atraviesa la sección de área A (igual al caudal constante que está siendo bombeado)

A =sección por la que circula el agua = $2 \cdot \pi \cdot r \cdot b$ [b = espesor del acuífero]

K =permeabilidad del acuífero

i = gradiente hidráulico = dh/dr

$$Q = (2 \cdot \pi \cdot r \cdot b) \cdot K \frac{dh}{dr}$$

$$\frac{dr}{r} = \frac{2 \pi b K}{Q} dh$$

Integrando entre r_1 y r_2 (Figura 8):

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{2\pi b K}{Q} \int_{h_1}^{h_2} dh$$

$$[\ln r]_{r_1}^{r_2} = \frac{2\pi K b}{Q} [h]_{h_1}^{h_2}$$

$$\ln r_2 - \ln r_1 = \frac{2 \pi T}{Q} (h_2 - h_1)$$

Como $h_2 - h_1 = s_1 - s_2$ (comprobarlo en la figura 9), la fórmula final puede expresarse de cualquiera de estas formas:

$$h_2 - h_1 = \frac{Q}{2 \pi T} \ln \frac{r_2}{r_1} ; \quad s_1 - s_2 = \frac{Q}{2 \pi T} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

Esta es la fórmula conocida como de Dupuit-Thiem², y refleja la forma del cono de descensos en función de la distancia, tal como habíamos aventurado anteriormente.

Cálculo del descenso a cualquier distancia: Necesitamos el dato de un solo punto de observación (a una distancia r_2 se ha producido un descenso s_2). Conociendo el caudal, Q , y la transmisividad del acuífero, T , se puede calcular el descenso (s_1) a cualquier distancia (r_1).

Un caso especial sería el cálculo del radio del cono o radio de influencia, R : basta calcular la distancia a la que el descenso es 0.

Bombeos de ensayo

En general un *bombeo de ensayo*³ es un bombeo realizado para medir los parámetros hidráulicos del acuífero, en el caso del régimen permanente, sólo la Transmisividad.

Para ello necesitamos dos puntos de observación, dos sondeos que estén abiertos en el mismo acuífero que se está bombeando (como en el esquema de la figura 8). Se miden las distancias y los descensos (a una distancia r_1 , el descenso estabilizado es de s_1 metros, a una distancia r_2 , el descenso es de s_2 metros), y, conocido el caudal de bombeo, Q , se despeja T .

Gráficamente, se calcula representando descensos en función de $\log(r)$ (Figura 10). Si disponemos de más de dos puntos de

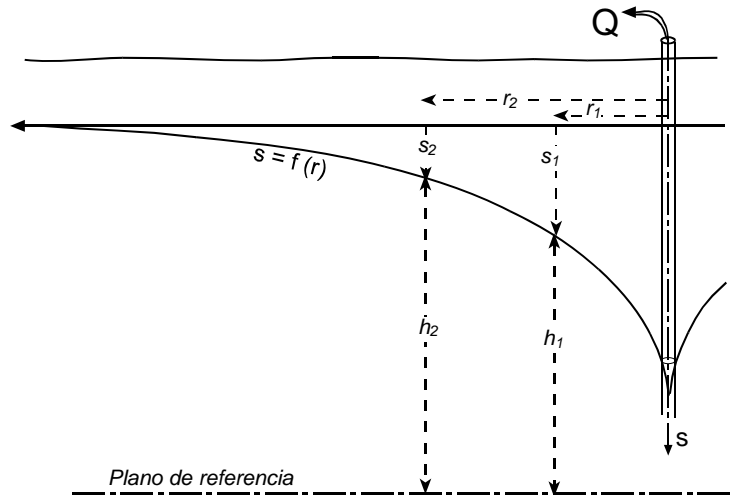


Figura 9.- Niveles y descensos en dos puntos de observación

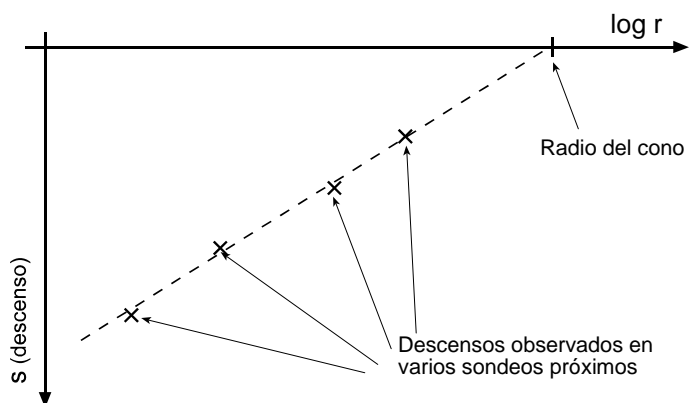


Figura 10.- Datos para un bombeo de ensayo en régimen permanente

² El francés Dupuit (1863) la desarrolló inicialmente (curiosa coincidencia, Dupuit significa *del pozo*), mientras que el alemán A. Thiem (1870, 1887) la aplicó para el cálculo de la Transmisividad del acuífero: los "bombeos de ensayo" que veremos en el apartado siguiente. También se cita con frecuencia el trabajo posterior de G. Thiem (1906)

³ Quizá está más generalizada la denominación de "ensayo de bombeo", pero ¡parece significar que estamos ensayando o intentando la realización de un bombeo!.

observación, como en la figura 10, el trazado de la recta será más fiable. Se obtiene una recta, ya que en la fórmula de Dupuit los descensos son una función lineal de los logaritmos de las distancias. El radio del cono se lee directamente, y de la pendiente de la recta se calcula la T. A mayor T, menor pendiente: pensemos que ese gráfico es una imagen deformada del cono de descensos, y habíamos visto que al aumentar la transmisividad, disminuía la pendiente del cono.

Aplicación de la fórmula Dupuit-Thiem a acuíferos libres

En principio, la fórmula no es válida para **acuíferos libres**, ya que a medida que el agua se acerca radialmente al sondeo no sólo disminuye el radio del cilindro imaginario que atraviesa el agua, sino también disminuye la altura de dicho cilindro (Figura 3, a). Además, el flujo ya no es horizontal como en el caso expuesto del confinado. No obstante, el error es aceptable si los descensos producidos son despreciables frente al espesor saturado del acuífero; habitualmente se acepta si los descensos no superan el 10% de dicho espesor, aunque esta condición en acuíferos libres de poco espesor (por ejemplo, aluviales) no se cumple.

Incluimos en un **Anexo** lo referente al régimen permanente en acuíferos libres.

Régimen variable (acuífero confinado)

Fórmula de Theis

La primera expresión matemática que refleja la forma del cono de descenso en régimen variable se debe a Theis, que en 1935 la elaboró a partir de la similitud entre el flujo del agua y el flujo de calor, estudiando el flujo radial del calor en una placa metálica. La expresión es:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad \text{donde:} \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

Q = Caudal de bombeo constante

T, S = Transmisividad y coeficiente de almacenamiento del acuífero

t = tiempo transcurrido desde el comienzo del bombeo

s = descenso

r = distancia a la que se produce el descenso s

u no es una variable que tenga significado físico, sólo se trata de una abreviatura en la formulación.

$W(u)$ es una función compleja de u bien conocida en Matemáticas, que en Hidráulica se denomina “función de pozo” (la W es porque *pozo* en inglés es *Well*):

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

La solución de esta integral para los distintos valores de u aparece tabulada en todos los textos de Hidrogeología (por ejemplo, en Watson (1995), pág.351). En un **Anexo** incluimos una versión simplificada de dicha tabla, suficiente para un cálculo aproximado.

Esta integral puede expresarse en forma de *serie* (suma de infinitos sumandos), así:

$$W(u) = -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \dots$$

Fórmula de Jacob

Cooper y Jacob, en 1946, apreciaron que en la serie que expresa $W(u)$, si u tiene un valor pequeño, la suma del tercer sumando y sucesivos es despreciable frente a los dos primeros. Sustituyendo $W(u)$ por estos dos primeros sumandos ($-0.5772 - \ln u$), y sustituyendo u por su valor, se obtiene la expresión:

$$s = 0,183 \frac{Q}{T} \log \frac{2,25.T.t}{r^2.S}$$

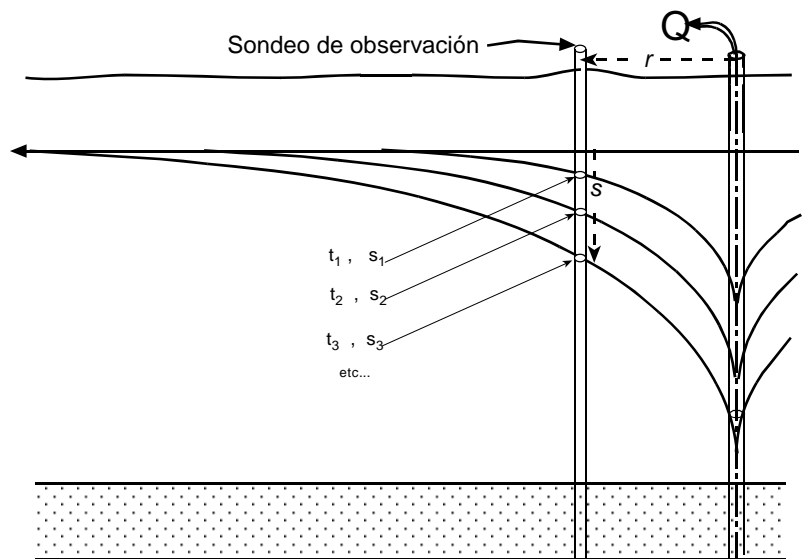
Suele adoptarse el valor de $u < 0,03$ para que esta simplificación sea aceptable. Estos valores pequeños de u se dan con valores grandes de t y pequeños de r : en general, no es aplicable en los primeros momentos del bombeo.

Tanto con la fórmula de Theis como con la simplificación de Jacob podremos calcular el descenso s que se producirá a una distancia r de un sondeo que bombea un caudal Q , transcurrido un tiempo t , conociendo los parámetros hidráulicos del acuífero, T y S . Si repetimos el cálculo para varias distancias, podremos dibujar el cono de descensos.

Bombeos de ensayo

Un bombeo de ensayo en régimen variable nos permitirá conocer los parámetros hidráulicos del acuífero, T y S . Necesitamos, además del sondeo que bombea, un sondeo de observación abierto en el mismo acuífero (Figura 11). En él mediremos la evolución del descenso con el tiempo.

Esos datos ($s - t$) para interpretarlos mediante la fórmula de Theis se representan en un gráfico $\log s - \log t$. Para la interpretación mediante la simplificación de Jacob, se representan los descensos en función de $\log t$, debiendo resultar una recta: efectivamente, en la expresión de Jacob se aprecia que el descenso es un función lineal del tiempo.



Resumen

Todo lo anterior se refiere a **acuíferos confinados**. Para acuíferos semiconfinados es más complejo y más aún para libres. No obstante, las líneas generales son válidas para todos ellos: Hemos visto que las fórmulas se pueden aplicar en ambos sentidos:

- (a) Si se conocen los parámetros hidráulicos del acuífero, podemos **evaluar el comportamiento del acuífero ante el bombeo** (calcular descensos, o qué caudal extraer para no superar un cierto descenso)
- (b) Si se conoce el comportamiento del acuífero ante el bombeo (hemos medido caudal y descensos), podemos **calcular los parámetros hidráulicos del acuífero**.

En ambas situaciones, y según se trate de régimen permanente o variable, los datos que deben tomarse en el campo y lo que podemos obtener de los cálculos se resumen así:

| | Ref. permanente | Reg. variable |
|--|---|--|
| Conocidos los parámetros del acuífero, calcular los descensos | <i>Datos:</i> $Q, T; s_2, r_2$ en un pozo de observación <i>Calculamos:</i> El descenso a cualquier otra distancia | <i>Datos:</i> Q, T, S <i>Calculamos:</i> El descenso a cualquier distancia r y transcurrido un tiempo t . |
| Bombeo de ensayo: Queremos medir los parámetros del acuífero | <i>Datos:</i> Q . Al menos dos sondeos de observación ($s_1, r_1; s_2, r_2$) <i>Calculamos:</i> La Transmisividad | <i>Datos:</i> Q . En un sondeo de observación, a una distancia r : $t_1, s_1 \quad t_2, s_2 \quad t_3, s_3 \quad \text{etc...}$ <i>Calculamos:</i> T y S del acuífero |

Anexo I: Valores de $W(u)$ para distintos valores de u

| | $x 1$ | $x 0,1$ | $x 0,01$ | $x 10^{-3}$ | $x 10^{-4}$ | $x 10^{-5}$ | $x 10^{-6}$ | $x 10^{-7}$ | $x 10^{-8}$ | $x 10^{-9}$ | $x 10^{-10}$ | $x 10^{-11}$ | $x 10^{-12}$ | $x 10^{-13}$ | $x 10^{-14}$ | $x 10^{-15}$ |
|-----|----------|---------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1,0 | 0,2194 | 1,8229 | 4,0379 | 6,3316 | 8,6332 | 10,936 | 13,238 | 15,541 | 17,843 | 20,146 | 22,449 | 24,751 | 27,054 | 29,356 | 31,659 | 33,962 |
| 1,5 | 0,1000 | 1,4645 | 3,6374 | 5,9266 | 8,2278 | 10,530 | 12,833 | 15,135 | 17,438 | 19,741 | 22,043 | 24,346 | 26,648 | 28,951 | 31,254 | 33,556 |
| 2,0 | 0,0489 | 1,2227 | 3,3547 | 5,6394 | 7,9402 | 10,243 | 12,545 | 14,848 | 17,150 | 19,453 | 21,756 | 24,058 | 26,361 | 28,663 | 30,966 | 33,268 |
| 2,5 | 0,0249 | 1,0443 | 3,1365 | 5,4168 | 7,7171 | 10,019 | 12,322 | 14,625 | 16,927 | 19,230 | 21,532 | 23,835 | 26,138 | 28,440 | 30,743 | 33,045 |
| 3,0 | 0,0130 | 0,9057 | 2,9591 | 5,2349 | 7,5348 | 9,8371 | 12,140 | 14,442 | 16,745 | 19,047 | 21,350 | 23,653 | 25,955 | 28,258 | 30,560 | 32,863 |
| 3,5 | 6,97E-03 | 0,7942 | 2,8099 | 5,0813 | 7,3807 | 9,6830 | 11,986 | 14,288 | 16,591 | 18,893 | 21,196 | 23,498 | 25,801 | 28,104 | 30,406 | 32,709 |
| 4,0 | 3,78E-03 | 0,7194 | 2,6813 | 4,9483 | 7,2472 | 9,5495 | 11,852 | 14,155 | 16,457 | 18,760 | 21,062 | 23,365 | 25,668 | 27,970 | 30,273 | 32,575 |
| 4,5 | 2,07E-03 | 0,6397 | 2,5684 | 4,8310 | 7,1295 | 9,4317 | 11,734 | 14,037 | 16,339 | 18,642 | 20,945 | 23,247 | 25,550 | 27,852 | 30,155 | 32,457 |
| 5,0 | 1,15E-03 | 0,5598 | 2,4679 | 4,7261 | 7,0242 | 9,3263 | 11,629 | 13,931 | 16,234 | 18,537 | 20,839 | 23,142 | 25,444 | 27,747 | 30,050 | 32,352 |
| 5,5 | 6,41E-04 | 0,5034 | 2,3775 | 4,6313 | 6,9289 | 9,2310 | 11,534 | 13,836 | 16,139 | 18,441 | 20,744 | 23,046 | 25,349 | 27,652 | 29,954 | 32,257 |
| 6,0 | 3,60E-04 | 0,4544 | 2,2953 | 4,5448 | 6,8420 | 9,1440 | 11,447 | 13,749 | 16,052 | 18,354 | 20,657 | 22,959 | 25,262 | 27,565 | 29,867 | 32,170 |
| 6,5 | 2,03E-04 | 0,4115 | 2,2201 | 4,4652 | 6,7620 | 9,0640 | 11,367 | 13,669 | 15,972 | 18,274 | 20,577 | 22,879 | 25,182 | 27,485 | 29,787 | 32,090 |
| 7,0 | 1,16E-04 | 0,3738 | 2,1508 | 4,3916 | 6,6879 | 8,9899 | 11,292 | 13,595 | 15,898 | 18,200 | 20,503 | 22,805 | 25,108 | 27,410 | 29,713 | 32,016 |
| 7,5 | 6,58E-05 | 0,3403 | 2,0867 | 4,3231 | 6,6190 | 8,9209 | 11,223 | 13,526 | 15,829 | 18,131 | 20,434 | 22,736 | 25,039 | 27,342 | 29,644 | 31,947 |
| 8,0 | 3,77E-05 | 0,3106 | 2,0269 | 4,2591 | 6,5545 | 8,8564 | 11,159 | 13,461 | 15,764 | 18,067 | 20,369 | 22,672 | 24,974 | 27,277 | 29,580 | 31,882 |
| 8,5 | 2,16E-05 | 0,2840 | 1,9711 | 4,1990 | 6,4939 | 8,7957 | 11,098 | 13,401 | 15,703 | 18,006 | 20,309 | 22,611 | 24,914 | 27,216 | 29,519 | 31,822 |
| 9,0 | 1,24E-05 | 0,2602 | 1,9187 | 4,1423 | 6,4368 | 8,7386 | 11,041 | 13,344 | 15,646 | 17,949 | 20,251 | 22,554 | 24,857 | 27,159 | 29,462 | 31,764 |
| 9,5 | 7,18E-06 | 0,2387 | 1,8695 | 4,0887 | 6,3828 | 8,6845 | 10,987 | 13,290 | 15,592 | 17,895 | 20,197 | 22,500 | 24,803 | 27,105 | 29,408 | 31,710 |

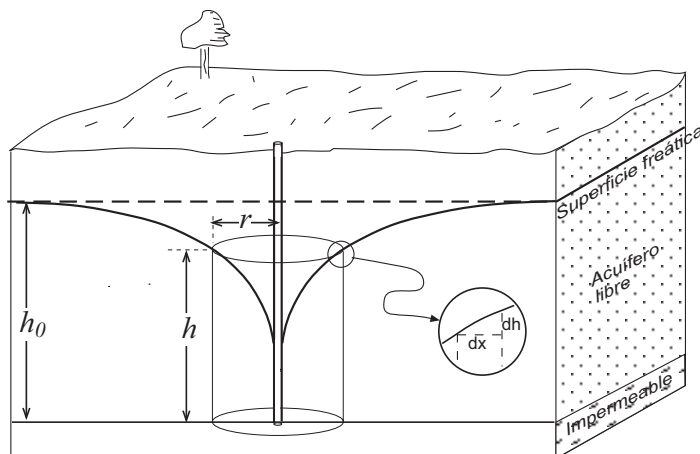
Por ejemplo, para $u = 0,0015 \rightarrow W(u) = 5,9266$

Anexo II: Régimen permanente en acuíferos libres

Al aplicar la formulación de Dupuit-Thiem a un acuífero libre, nos encontramos con dos fuentes de error: la menor de ellas consiste en que el flujo no es horizontal y por tanto las superficies equipotenciales no tienen forma cilíndrica.

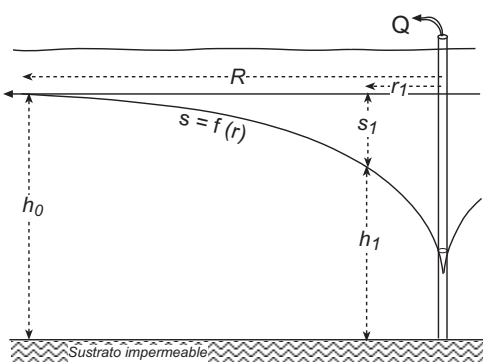
Incluso despreciando este error, ya hemos visto (Figura 3) que, a medida que el flujo se acerca al pozo, no solamente disminuye el radio, sino también la altura de los cilindros concéntricos que atraviesa el flujo.

Vamos a repetir el razonamiento que hicimos para deducir la formulación de Dupuit-Thiem, aplicando Darcy al flujo a través de un cilindro de radio r y altura h . (Ver la figura adjunta)



$$Q = (2 \cdot \pi \cdot r \cdot h) \cdot K \cdot \frac{dh}{dr} \quad ; \quad \frac{dr}{r} = \frac{2 \pi h K}{Q} dh$$

Recordemos que en confinados simplificábamos haciendo *espesor*. $K=T$, pero aquí el espesor h no es constante. Allí integrábamos entre dos distancias cualesquiera, r_1 y r_2 , aquí tomaremos r_1 y R (radio del cono); para estas distancias, los potenciales (altura del agua) serán, respectivamente h_1 y h_0 .



Integrando entre r_1 y R :

$$\int_{r_1}^R \frac{dr}{r} = \frac{2\pi K}{Q} \int_{h_1}^{h_0} h dh \quad ; \quad [\ln r]_{r_1}^R = \frac{2\pi K}{Q} \left[\frac{h^2}{2} \right]_{h_1}^{h_0}$$

$$\ln \frac{R}{r_1} = \frac{\pi K}{Q} (h_0^2 - h_1^2) \quad (A.1)$$

Una primera simplificación sería la siguiente:

$$(h_0^2 - h_1^2) = (h_0 - h_1) \cdot (h_0 + h_1) = s_1 \cdot (h_0 + h_1) \simeq s_1 \cdot (2h_0) \quad (A.2)$$

Ya que si el descenso es pequeño en comparación con el espesor saturado, aproximadamente: $(h_0 + h_1) \simeq (2h_0)$. Sustituyendo (A.2) en (A.1) resulta:

$$\ln \frac{R}{r_1} = \frac{\pi K}{Q} (s \cdot 2h_0) \quad ; \quad \ln \frac{R}{r_1} = \frac{2\pi K h_0}{Q} s \quad ; \quad s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r_1} \quad (A.3)$$

Que es la misma fórmula que habíamos obtenido para acuíferos confinados (haciendo $r_2=R$, y $s_2=0$). Esta simplificación será válida si s_1 es menor del 10% de h_0 (ver figura).

Ahora veremos la llamada **corrección de Jacob** (1969, en Custodio, 1983, p. 644):

$$(h_0^2 - h_1^2) = (h_0 - h_1) \cdot (h_0 + h_1) = (h_0 - h_1) \cdot (2h_0 - h_0 + h_1) = (h_0 - h_1) \cdot (2h_0 - (h_0 - h_1))$$

Como $(h_0 - h_1)$ es el descenso, s , producido a una distancia r , resulta:

$$(h_0^2 - h_1^2) = s \cdot (2h_0 - s) \quad (A.4)$$

Sustituyendo (A.4) en (A.1) resulta:

$$\ln \frac{R}{r_1} = \frac{\pi K}{Q} \cdot s \cdot (2h_0 - s)$$

Operando, se obtiene:

$$\ln \frac{R}{r_1} = \frac{2\pi K h_0}{Q} \cdot \left(s - \frac{s^2}{2h_0} \right) \quad ; \quad s - \frac{s^2}{2h_0} = \frac{Q}{2\pi K h_0} \ln \frac{R}{r_1} \quad (A.5)$$

Si llamamos **descenso corregido** a:

$$s_c = s - \frac{s^2}{2h_0} \quad (A.6)$$

la ecuación (A.5) queda:

$$s_c = \frac{Q}{2\pi K h_0} \ln \frac{R}{r_1} \quad (A.7)$$

Que es la misma ecuación (A.3), equivalente a la de acuíferos confinados, pero utilizando los *descensos corregidos* mediante la expresión (A.6), en lugar de los descensos reales. Es decir: que podemos utilizar las fórmulas correspondientes a confinados para libres a condición de que trabajemos con descensos corregidos (A.6) Para ello tenemos que conocer el espesor saturado inicial del acuífero libre: h_0 .

Si se realiza un *bombeo de ensayo*, los descensos medidos en el campo habría que *corregirlos* mediante la expresión (A.6) antes de realizar los correspondientes cálculos.