



**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 I**

### **1. LOS ACUIFEROS Y SUS PROPIEDADES**

#### **1.1 INTRODUCCION**

El estudio del agua subterránea es importante para la realización de obras de ingeniería, para la ejecución de investigaciones geológicas y muy especialmente para el desarrollo de obras de captación de dicha agua con fines de abastecimiento para satisfacer las necesidades del hombre.

Las formaciones geológicas en que se acumula el agua subterránea y que son capaces de cederla reciben el nombre de acuíferos. Los acuíferos sirven como conductos de transmisión y como depósitos de almacenamiento. Como conductos de transmisión transportan el agua subterránea de las áreas de recarga, hacia lagos, pantanos, manantiales, pozos y otras estructuras de captación. Como depósitos de almacenamiento, los acuíferos actúan suministrando agua de sus reservas para ser utilizada cuando la extracción exceda a la recarga y, a la vez, almacenando agua durante los períodos en que la recarga resulta mayor que la extracción.

De lo dicho anteriormente, se ve claramente que los acuíferos se caracterizan por ser permeables al agua, es decir, por permitir el paso de ésta a través de ellos; pero, junto a los acuíferos propiamente dichos, aparecen otras formaciones geológicas que reciben nombres de acuerdo con sus posibilidades de contener agua y de permitir su circulación, tales como: los acuicludos o acuicierres, los acuitardos y los acuífugos.

Los acuicludos o acuicierres (del latín claudere = cerrar) son formaciones geológicas impermeables que contienen agua, pero que no la transmiten, haciendo de este modo imposible su explotación. En este caso están las arcillas, que a pesar de contener enormes cantidades de agua (en muchos casos, más de 50% de su volumen) no la drenan por gravedad ni la dejan pasar; por consiguiente, no son aptas para la construcción en ellas de captaciones de agua subterránea.

Los acuitardos (del latín tardare = retardar) son formaciones geológicas semipermeables que, conteniendo agua en gran cantidad, la transmiten muy lentamente, por lo que en estas formaciones tampoco resulta adecuado emplazar captaciones; no obstante, en determinados casos, la presencia de un acuitardo puede proporcionar a un acuífero que esté en contacto con él, una recarga vertical que puede llegar a ser importante. Las arcillas limosas y arenosas son formaciones que pueden comportarse como acuitardos.

Los acuífugos (del latín fugere = huir) son aquellas formaciones geológicas impermeables que no contienen agua ni la pueden transmitir, tales como, por ejemplo, los macizos recosos no alterados.

## **1.2 CARACTERISTICAS GEOLOGICAS GENERALES DE LOS ACUIFEROS**

Como es evidente, no todas las formaciones geológicas poseen las propiedades que caracterizan a un acuífero, es decir, que sus intersticios o espacios huecos, sean capaces de almacenar el agua y de servirle de conductos a la vez para transmitirla, permitiendo su aprovechamiento para satisfacer las necesidades del hombre. Desde este punto de vista, el concepto de acuífero es en cierto modo relativo, ya que una formación geológica que sea capaz, por ejemplo, de producir 1L/s, no se considerará como acuífero, en un lugar donde haya otras en que sea posible captar 50 L/s o más; pero en una región árida, donde no haya otras posibilidades, a pesar del ínfimo caudal, esa formación que brinda 1 L/s, para resolver las necesidades de una pequeña población, constituye sin duda un acuífero, aunque pobre.

Los espacios huecos o intersticios que presentan las rocas que componen los acuíferos, pueden ser poros o vacíos intergranulares, como en el caso de rocas formadas por depósitos sedimentarios granulares (grava y arena) consolidados o no, o fracturas, fisuras y canales de disolución. Parece oportuno destacar aquí, que una porosidad alta puede ser una buena cualidad de un acuífero pero que la alta porosidad no significa, al mismo tiempo, la posibilidad de transmitir grandes cantidades de agua. (Las arcillas, como se dijo, son muy porosas pero a la vez poco permeables).

La existencia de dos tipos, en general, de intersticios ha hecho que algunos autores europeos (ver Castany [\(1\)](#) y Schneebeili [\(9\)](#)) hablen de rocas y terrenos de permeabilidad por porosidad y permeabilidad por fisuración.

Las formaciones geológicas que constituyen acuíferos pueden incluirse en uno de estos dos grupos:

- I. Acuíferos formados por depósitos no consolidados.
- II. Acuíferos formados por rocas consolidadas.

Los acuíferos formados por depósitos no consolidados, están constituidos por materiales sueltos, fundamentalmente, arenas, gravas o mezclas de ambas de origen geológico muy diverso.

Según Todd [\(11\)](#) el 90% de los acuíferos en explotación en el mundo, caen bajo esta categoría.

Los acuíferos formados por rocas consolidadas pueden presentarse en:

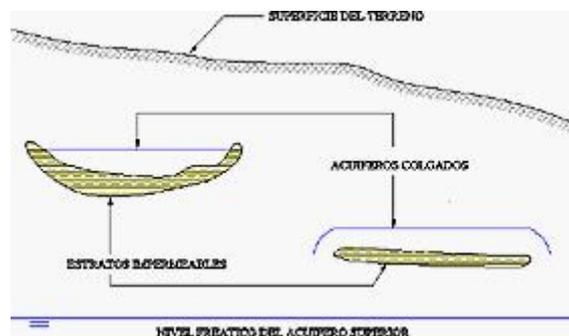
- a) Calizas y dolomías (fisuradas, fracturadas y karstificadas).
- b) Conglomerados o areniscas (disueltas y con algunas partes cementadas).
- c) Rocas volcánicas alteradas (escoriáceas)
- d) Algunas rocas cristalinas (granitos fracturados, por ejemplo)

### 1.3 DISTINTOS TIPOS DE ACUIFEROS

De acuerdo con el grado de confinamiento de las aguas que contienen, los acuíferos pueden clasificarse en cuatro tipos:

- a) Acuíferos libres, freáticos o no confinados.
- b) Acuíferos confinados o artesianos
- c) Acuíferos semiconfinados (leaky aquifers)
- d) Acuíferos semilibres.

Los acuíferos libres son aquellos en que el agua subterránea presenta una superficie libre, sujeta a la presión atmosférica, como límite superior de la zona de saturación. Esta superficie libre se conoce como superficie freática y el nivel a que ella se eleva, respecto a otro de referencia, nivel freático. Está formado en general por un estrato permeable parcialmente saturado de agua que yace sobre otro estrato impermeable o relativamente impermeable. En la mayoría de los casos existe solamente un nivel freático, pero en algunos casos, a causa de la presencia de acuíferos o acuitardos de pequeñas dimensiones relativas, pueden existir acuíferos que se denominan acuíferos colgados con niveles freáticos adicionales, tales como aparecen en la figura 1.1.

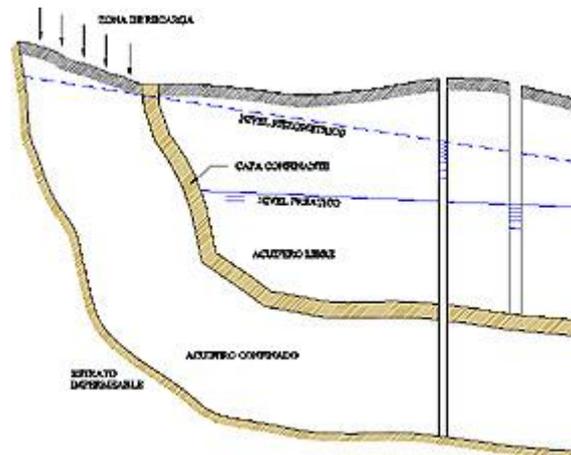


**Fig. 1.1. Acuíferos colgados**

En algunos acuíferos libres compuestos de partículas finas el drenaje por gravedad de los poros con frecuencia puede que no sea instantáneo y, en ese caso, el acuífero entrega el agua un cierto tiempo después de que el nivel freático baja en el mismo. A este tipo de acuífero se les denomina libres con entrega retardada.

En los pozos perforados en este tipo de acuífero, el agua se eleva hasta el nivel freático. Los acuíferos confinados o artesianos son formaciones geológicas permeables, completamente saturadas de agua, confinadas entre dos capas o estratos impermeables o prácticamente impermeables (una inferior y otra superior). En estos acuíferos, el agua está sometida, en general, a una presión mayor que la atmosférica y al perforar un pozo en ellos, el agua se eleva por encima de la parte superior (techo) del acuífero hasta un

nivel que se denomina nivel piezométrico. La superficie imaginaria que representa la carga piezométrica en los distintos puntos del acuífero se conoce como superficie piezométrica. En algunos casos, la superficie piezométrica puede estar por encima del nivel del terreno natural, por lo que un pozo perforado en el lugar fluirá solo, como si fuera un manantial. Los acuíferos confinados se nombran también artesianos, a causa de que en la región francesa de Artois fue el primer lugar donde se perforaron pozos profundos en acuíferos confinados, alrededor del año 1750. Originalmente, el término artésiano se aplicaba solamente a los pozos fluentes, pero en la actualidad, la palabra se aplica a cualquier pozo perforado en un acuífero confinado.



**Fig. 1.2. Acuífero libre y acuífero confinado**

En la figura 1.2 puede apreciarse la representación esquemática de un corte geológico que muestra un acuífero libre y uno confinado en la misma zona.

Los acuíferos semiconfinados son acuíferos completamente saturados sometidos a presión que están limitados en su parte superior por una capa semipermeable (acuitardo) y en su parte inferior por una capa impermeable (acuicierre o acuífugo) o también por otro acuitardo. En este tipo de acuífero, la disminución de la carga piezométrica originada por el bombeo, por ejemplo, inducirá un flujo vertical del agua contenida en el acuitardo, que actuará como recarga del acuífero. Las características del acuitardo confinante en un acuífero semiconfinado son tales que puede ignorarse la componente horizontal del flujo en el acuitardo.

Los acuíferos semilibres representan una situación intermedia entre un acuífero libre y uno semiconfinado. En este caso, la capa confinante superior es un estrato semipermeable o acuitardo, de características tales que la componente horizontal del flujo no puede ignorarse.

Kruseman y De Ridder (3), partiendo de considerar los acuíferos apoyados en una capa impermeable, especifican que el tipo de acuífero queda determinado por el carácter de la capa confinante superior y presentan el cuadro que aparece en la tabla 1.1 como instrumento para caracterizar los acuíferos.

**TABLA 1.1.**  
**CARACTERIZACION DE LOS ACUIFEROS**

<b>Capa Superior</b>	<b>Tipo de Acuífero</b>
Impermeable (acuicierre)	Confinado
Semipermeable (acuitardo) en que puede ignorarse la componente horizontal del flujo	Semiconfinado
Semipermeable (acuitardo), menos permeable que la parte principal del acuífero, en que hay que tomar en cuenta la componente horizontal del flujo	Semilibre
Igual que la parte principal del acuífero	Libre

#### **1.4 PROPIEDADES HIDROGEOLOGICAS DE LOS ACUIFEROS**

En el comportamiento hidráulico de los acuíferos pueden distinguirse diversas propiedades que se describen a continuación y que se utilizan para caracterizar dicho comportamiento y establecer sus leyes.

En general puede decirse que la velocidad  $U$  con que circula el agua subterránea es proporcional a una potencia del gradiente hidráulico  $I$ , multiplicada por una constante de proporcionalidad denominada **conductividad hidráulica**.

La conductividad hidráulica representa la mayor o menor facilidad con que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo. Tiene las dimensiones de una velocidad ( $L T^{-1}$ ) y modernamente se distinguen dos tipos: (4) **la conductividad hidráulica darciana o lineal,  $KD$  y la conductividad hidráulica turbulenta,  $KT$** .

La **transmisibilidad o transmisividad** es el producto del espesor saturado del acuífero  $m$  y la conductividad hidráulica. Tiene las dimensiones  $L^2 T^{-1}$ , y lógicamente se distinguirán dos tipos: la transmisibilidad darciana o lineal,  $TD$  ( $TD = m KD$ ) y la transmisibilidad turbulenta,  $TT$  ( $TT = m KT$ ).

Diversos experimentos (8) han demostrado que la conductividad hidráulica darciana no sólo depende de las características del medio, sino también de las del fluido (su viscosidad y peso específico) por lo que se estableció una relación entre  $KD$ , las propiedades del fluido y una característica intrínseca del medio que es independiente del fluido que circula a través de él. Esa característica se denomina (**permeabilidad intrínseca o geométrica**) y se representará por el símbolo  $k$ . La ecuación que relaciona  $KD$  con  $k$  se puede expresar como:

$$k_D = \frac{\gamma}{\mu} k = \frac{g}{\nu} k \quad (1.1)$$

y también:

$$k = \frac{\nu}{g} K_D \quad (1.2)$$

donde:

$\gamma$ , peso específico absoluto del fluido  
 $\mu$ , viscosidad dinámica del fluido  
 $g$ , aceleración de la gravedad  
 $\nu$ , viscosidad cinemática del fluido

La permeabilidad intrínseca tiene las dimensiones de una longitud al cuadrado (L<sup>2</sup>).

Por otra parte, el autor (5) ha demostrado que al considerar el flujo en medios porosos en su forma más general no lineal, es necesario tomar en consideración un nuevo parámetro adimensional característico de cada medio, o sea una nueva propiedad intrínseca, que por analogía con el flujo en tuberías denomina rugosidad equivalente, y que se representa por el símbolo C. Esta propiedad está relacionada con la conductividad hidráulica turbulenta por la expresión (6).

$$K_T = \left( \frac{gk^{\frac{1}{2}}}{C} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

Como se puede ver, al disponer de las ecuaciones 1.1 y 1.3 es posible utilizar indistintamente para caracterizar el medio las propiedades KD y KT o en su lugar k y C.

Se ha definido como **coeficiente de almacenamiento**, que se representará por el símbolo, E, como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero, de sección unitaria y de altura igual a su espesor saturado, cuando se produce un descenso unitario de la carga hidráulica (del nivel piezométrico o del nivel freático). De esta definición se deduce que el coeficiente de almacenamiento es adimensional. El concepto fue introducido en la Hidráulica Subterránea en 1935 por C.V. Theis (10).

En el caso de los acuíferos confinados, el agua liberada procede de los efectos mecánicos de la compresión del cuerpo del acuífero y del agua. En el caso de los acuíferos libres o freáticos, ignorando los efectos relativamente pequeños que puede introducir la elasticidad del acuífero, resulta claro que el coeficiente de almacenamiento es equivalente, a la llamada **porosidad efectiva**, ya que en ambos casos resulta ser la

cantidad de agua que puede ser extraída por gravedad de una unidad de volumen del acuífero saturado.

Tanto para acuíferos confinados como para acuíferos libres las propiedades a considerar y determinar serían cualesquiera de los tres tríos:

k, C y E  
KD, KT y E  
TD, TT y E

ya que las ecuaciones de transformación de que se dispone permiten calcular todo el conjunto si se tienen los valores de uno cualquiera de los tríos.

Para el análisis de acuíferos semiconfinados es necesario tener en cuenta dos nuevas propiedades, la resistencia hidráulica y el factor de goteo.

La **resistencia hidráulica**, representada por el símbolo  $C'$ , es una medida de la resistencia que ofrece la capa confinante al flujo en dirección vertical, y se define por la relación entre el espesor saturado del acuitardo,  $m'$  y su conductividad hidráulica darciana vertical,  $K'_D$ , o sea que:

$$C' = \frac{m'}{K'_D} \quad (1.4)$$

Las dimensiones de la resistencia hidráulica son las del tiempo. Si el acuífero es confinado, el acuitardo se convierte en acucierre y  $C' = \infty$

El **factor de goteo** (leakage factor) representado por el símbolo  $B$ , tiene las dimensiones de una longitud y está definido por la ecuación:

$$B = (C'T_D)^{\frac{1}{2}} = (C'm K_D)^{\frac{1}{2}} = (mm' \frac{K_D}{K'_D})^{\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

Los valores altos de  $B$  indican una gran resistencia al flujo del acuitardo confinante en comparación con el acuífero, lo que implica una pequeña influencia relativa en la recarga del acuífero a partir del acuitardo.

En el análisis de acuíferos libres con entrega retardada o semilibres, es necesario tener en cuenta el llamado **factor de drenaje**,  $D$ , que está definido por la ecuación:

$$D = \left( \frac{K_D m}{\alpha S_y} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.6)$$

donde:  $\alpha$ , inverso del índice de retraso de Boulton ( $1/\alpha$ ).

$S_y$ , volumen total de entrega retardada procedente del almacenamiento, por unidad de abatimiento por unidad de área horizontal. (Rendimiento específico después de un tiempo grande de bombeo)

Los valores altos de  $D$  indican un drenaje rápido. Si  $D = \infty$ , la entrega es instantánea al descender la superficie freática y el acuífero será libre sin entrega retardada. El factor de drenaje tiene dimensiones de longitud.