

alcanza el nivel freático (la superficie plana del *agua freática*) en donde comienza la *zona saturada*. La *percolación vertical* no saturada se convierte en el flujo horizontal saturado. Arriba del nivel freático se encuentra la *franja capilar* (véase también figura 12d).

#### "Aguas muertas"

- Aguas de poros no conectados entre sí (p.ej. en basaltos vesiculares)
- Aguas de acuíferos cerrados (véase pág. 7)
- Agua de cristal (p.ej. la anhidrita se cambia en yeso por la incorporación de agua con un consecuente aumento de volumen:  $\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )

#### Definiciones de agua subterránea

Según el concepto amplio, generalmente utilizado en las ciencias, así como en este libro, el agua subterránea es *toda el agua debajo de la superficie de la tierra que actualmente participa en el ciclo hidrológico o que está almacenada de tal modo que puede entrar nuevamente en este ciclo*.

Las concepciones y definiciones jurídicas suelen ser más estrictas. Según éstas el agua subterránea es *el agua que rellena coherentemente las oquedades subterráneas y que obedece a la gravedad*.

## El acuífero

### Definición. Conceptos

El acuífero es *el medio rocoso en que se mueve el agua subterránea* (concepto amplio). Existe también una definición estricta (véase pág. 22).

Normalmente el concepto *acuífero* se confina en rocas que conducen cantidades de agua económicamente utilizables.

Funciones del acuífero: El acuífero es

- almacén de agua subterránea
- conductor de agua subterránea
- medio de intercambio geoquímico.

Tradicionalmente las rocas se clasifican por sus propiedades conductoras como sigue: Buenas conductoras — acuíferos

Malas conductoras (o semi-conductoras) — "acuitardos"

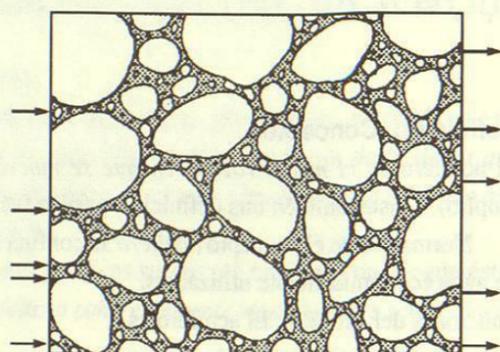
"No-conductoras" — acuífugos

Dirigida por el interés práctico, la hidrogeología clásica se enfocaba en los acuíferos. Las rocas de conductividad (permeabilidad) baja se consideraban como "no-conductoras" y quedaban como *acuífugos* fuera del interés. Sin embargo rocas no-conductoras no existen, con excepción de algunos evaporitas y de la roca de altas profundidades. Por eso casi todas las rocas se pueden estudiar como acuíferos, y la clasificación clásica se reduce a una escala cuantitativa de las conductividades hidráulicas hasta valores muy pequeños, sino es que finitos (véase pág. 55, fig. 60). De éstos se ocupa la *Hidrogeología de Rocas de Permeabilidad Baja* como especialidad nueva de la hidrogeología, que se basa en la necesidad de estudiar las propiedades hidrogeológicas de sitios para depósitos de desechos peligrosos. No obstante, en un sentido relativo, el concepto *acuífugo* siempre está utilizable (véase figura 18).

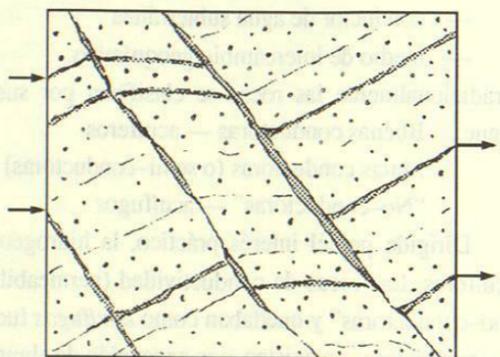
**Tipos de acuíferos litológicos**

Existen tres tipos, los principales son:

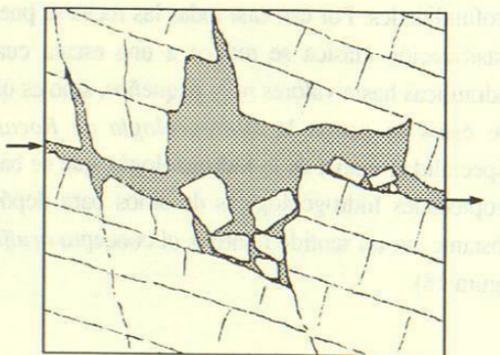
- *Acuíferos de poros*. En su mayor parte se trata de sedimentos sueltos (gravas, arenas). Figura 14
- *Acuíferos de grietas*: Rocas consolidadas como areniscas, calizas no carstificadas, basaltos, granitos u otras rocas extrusivas e intrusivas, gneisses. Figura 15
- *Acuíferos cársticos*: Rocas carstificadas (calizas, dolomías, yeso, véase págs. 158–164). Figura 16



**Figura 14:** Acuífero de Poros. El agua se mueve en los poros (intersticios)



**Figura 15:** Acuífero de Grietas. El agua se mueve en las fracturas abiertas de origen tectónico o de intemperismo. El contenido de poros generalmente es despreciable



**Figura 16:** Acuífero Cárstico. El agua se mueve en los huecos cársticos de diámetros muy variables (canales, cavernas). El contenido de poros es despreciable

Las propiedades de estos tres tipos de acuíferos son muy diferentes. Por el grado elevado de isotropía y homogeneidad de los acuíferos de poros la Geohidráulica tradicionalmente se enfoque en este tipo de acuífero como objetivo de investigación básica. Por razones didácticas este libro sigue a esa tradición. Las propiedades especiales de los acuíferos de grietas y cársticos son tratados en la página 164.

Algunos acuíferos de grietas contienen además de su permeabilidad y porosidad primaria (de grietas) una permeabilidad y porosidad secundaria no despreciable, que consiste en los poros intersticiales (véase págs. 90–91).

**Porosidad. Definición general**

La capacidad del acuífero de almacenar agua está determinada por su porosidad. El concepto *porosidad* (o *volumen de poros*) se utiliza también para el *volumen de grietas* y el *volumen de huecos cársticos*. La zona saturada del acuífero consiste en la matriz rocosa y en huecos (poros, intersticios) rellenos de agua.

Definición: La porosidad *p* es la parte o porcentaje del volumen de poros en un acuífero relleno de agua:

$$p = \frac{V_A}{V_R} \text{ [ sin dim ]}$$

en lo que  $V_A$ : volumen de agua [m<sup>3</sup>]  
 $V_R$ : volumen total de roca [m<sup>3</sup>].

$$y: \quad p = \frac{V_A \cdot 100}{V_P} \text{ [ \% ]}$$

**Ejemplo** de un acuífero de poros: 1000 ml de arena saturada con agua contienen 200 ml de agua. La porosidad de esta arena es  $p = 0.2$  (20%).

La porosidad de acuíferos cársticos y de grietas normalmente es mucho menor, siendo de un orden de tamaño de 0.01 (1%).

Por el concepto *coeficiente de almacenamiento*, relacionado a la porosidad, véase págs. 62–64, por otros conceptos de porosidad: págs. 57–58.

**Permeabilidad**

La *permeabilidad* (*conductividad o conductibilidad hidráulica*) es la capacidad de un acuífero de conducir agua. Hay que diferenciar entre el concepto general de permeabilidad y la permeabilidad intrínseca (véase págs. 54, 55). La permeabilidad

de acuíferos de poros depende de su composición granulométrica, véase pág. 50. La figura 17 muestra tres sustratos de permeabilidades diferentes.

Un sustrato de permeabilidad mediana puede funcionar como acuífero o como acuífugo, dependiente de su posición geológica (relatividad de permeabilidades, figura 18).

Entre la porosidad y la permeabilidad de un acuífero generalmente no existe una relación directa. Sin embargo los acuíferos de permeabilidad alta normalmente tienen también porosidades elevadas. Excepciones: Hay rocas de porosidad alta, que tienen permeabilidades muy bajas (p.ej. basaltos vesiculares, arcillas).

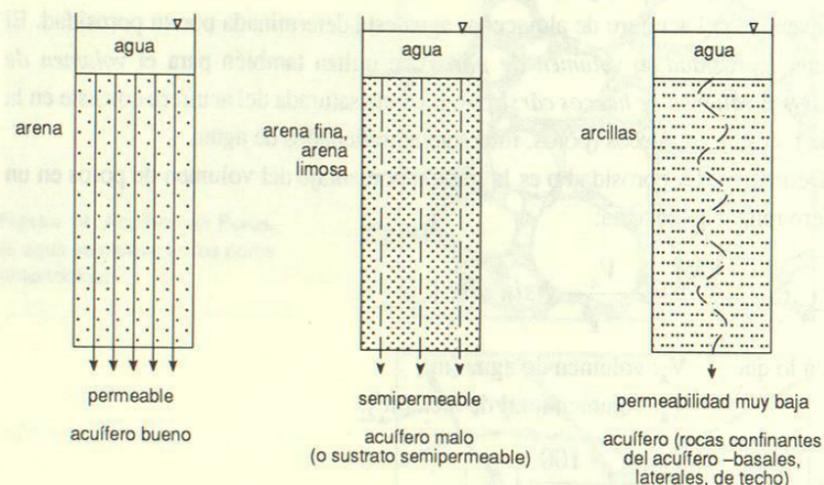


Figura 17: Tres categorías de sustratos de permeabilidad diferente.— Según CASTANY 1982, modificado

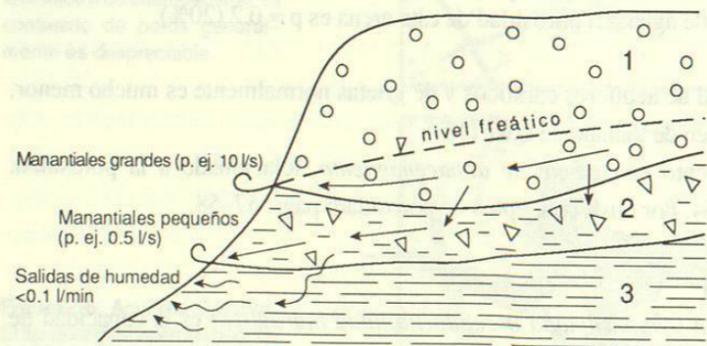


Figura 18: Relatividad de permeabilidades

**Anisotropía e Inhomogeneidad**

Un acuífero (o una parte de él) es *isótropo*, si sus características físicas (especialmente su permeabilidad) son constantes en las tres direcciones del espacio (véase figura 19, caso 1). En el caso contrario es *anisótropo* (2,3,4). Se diferencia entre *anisotropía vertical* (2,3) y *anisotropía horizontal* (4).

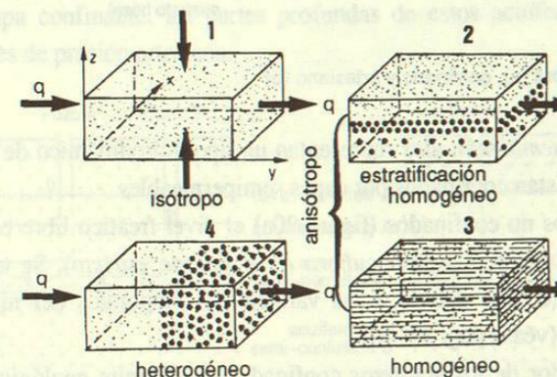


Figura 19: Cuatro casos de isotropía (1), anisotropía (2,3,4), homogeneidad (1,2,3) y heterogeneidad (4).— Tomado de CASTANY (1982)

Un acuífero (o una parte de él) es *homogéneo* si presentan en todos los puntos en el sentido del escurrimiento características físicas constantes (1, 2, 3). En el caso contrario es *heterogéneo* (4). Un ambiente permeable homogéneo puede ser isótropo (1) o anisótropo (2, 3). Un ambiente permeable heterogéneo siempre es anisótropo (4).

Los conceptos de anisotropía e inhomogeneidad son de importancia especialmente en los acuíferos de grietas y cársticos, ya que los acuíferos isótropos y homogéneos de estos tipos litológicos prácticamente no existen.

**Tipos y conceptos hidrodinámicos**

Un acuífero normalmente está delimitado hacia abajo por un sustrato de baja permeabilidad (figura 20a y b). En muchos casos existen también límites laterales, p.ej. las pendientes de un canal de gravas (véase figuras 31 y 42), o capas de baja permeabilidad adyacentes en posición tectónica más o menos vertical (véase figura 29). Por sus límites superiores los acuíferos son clasificados en dos tipos hidrodinámicos principales:

- *acuíferos no confinados (acuíferos libres)*, sin techo confinante (figura 20a),
- *acuíferos confinados*, con techo confinante, formado por capas de baja permeabilidad (figura 20b).

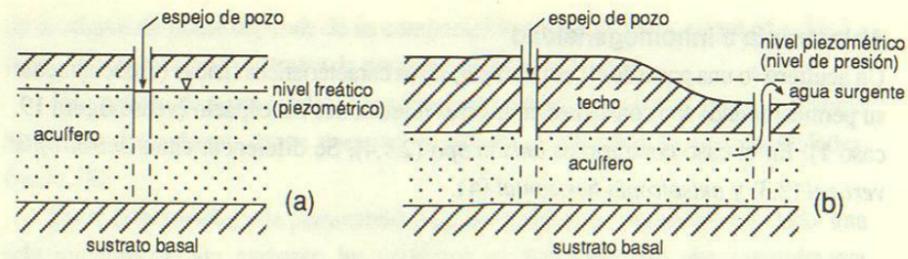


Figura 20: Acuífero libre (a), confinado y artesiano (b)

Los *acuíferos semiconfinados* representan un tipo hidrodinámico de transición (figura 22, 1 y 2). Están confinados por capas semipermeables.

En los acuíferos no confinados (figura 20a) el nivel freático libre es el límite superior del manto freático (o del *acuífero en el sentido estricto*). Se trata de un límite hidrodinámico, que debido a las variaciones temporales del nivel no se mantiene constante (véase pág. 37-40).

El límite superior de los acuíferos confinados es el límite geológico entre el acuífero y la capa confinante (techo del acuífero, figura 20b). Cuando un pozo ha atravesado la capa confinante y alcanzado el acuífero confinado, el agua sube en el pozo hasta alcanzar el nivel de presión del acuífero confinado.

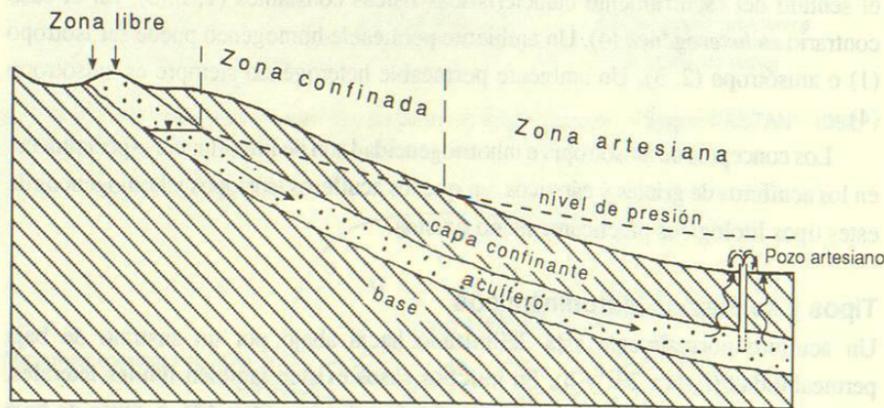


Figura 21: Acuífero con zona libre, zona confinada y zona artesiana. El nivel de presión se baja rumbo al flujo del agua confinada por el consumo de energía en el acuífero (véase pág. 48)

*Acuífero artesiano*: El mismo acuífero puede estar conformado por una zona no confinada con nivel freático libre y una zona confinada (figura 21). En la parte donde la superficie del terreno desciende debajo del nivel de presión, el acuífero confinado

se convierte en un acuífero artesiano (nombre derivado de la provincia de Artois, Francia). Las perforaciones que alcanzan al acuífero en esta zona se convierten en *pozos artesianos o surgentes*, de los cuales el agua subterránea brota libremente.

No todos los pozos artesianos corresponden a este modelo. La pura situación topográfica baja, puede causar en acuíferos de gran espesor una distribución vertical del *potencial hidráulico* (véase págs. 48-50 y figura 55), de modo que sin existencia de una capa confinante, las partes profundas de estos acuíferos libres están en condiciones de presión artesiana.

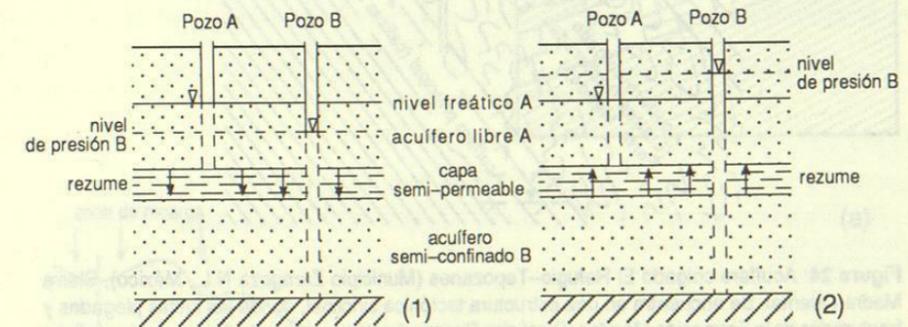


Figura 22: Acuíferos semiconfinados.

- Caso 1: presión del acuífero semiconfinado B < presión del acuífero libre A; rezume por la capa semipermeable hacia abajo
- Caso 2: presión del acuífero semiconfinado B > presión del acuífero libre A; rezume por la capa semipermeable hacia arriba

**Pisos de agua subterránea**

Consisten en acuíferos de profundidades diferentes, separados por capas de permeabilidad baja (figura 23).

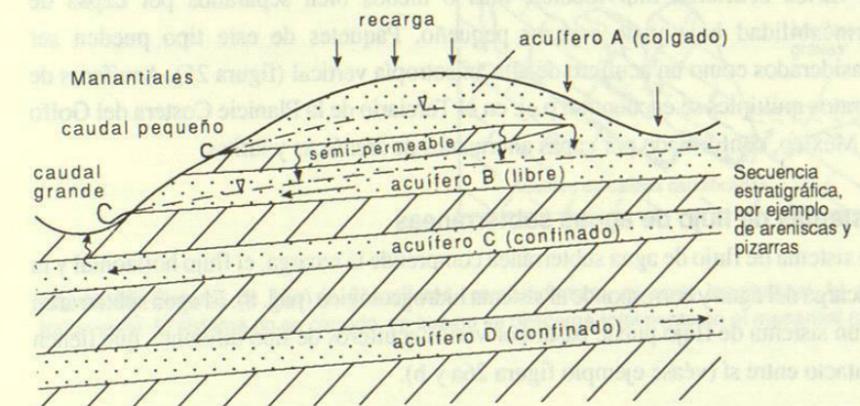
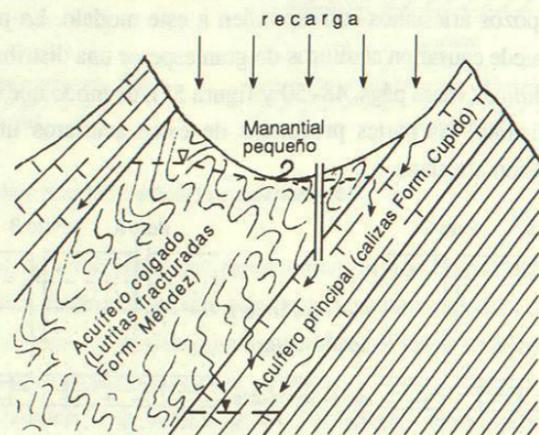


Figura 23: Pisos de agua subterránea. Los pisos bien separados tienen presiones, mineralizaciones y temperaturas diferentes

Los acuíferos colgados son acuíferos libres de menor importancia, colocados sobre un acuífero principal no confinado, de modo que se encuentran en la zona no saturada de este último (figura 23 y ejemplo concreto figura 24).



**Figura 24:** Acuífero colgado El Refugio-Tepozanes (Municipio Zaragoza N.L., México); Sierra Madre Oriental. Se encuentra en una estructura tectónica sinclinal, donde las lutitas plegadas y fracturadas de la Formación Méndez (Cretácico Superior) están en contacto directo con las calizas carstificadas de la Formación Cupido (Cretácico Inferior). Las permeabilidades del acuífero colgado son de orden medio hasta pequeño (manantiales con gastos hasta aprox. 1 l/s; un pozo perforado con un gasto máx. de 5 l/s). El acuífero principal carstificado está drenado por manantiales con gastos de hasta 1000 l/s, situados en un valle vecino muy profundo. La existencia del piso colgado supone que la recarga del acuífero colgado es más grande que el rezume al acuífero principal.

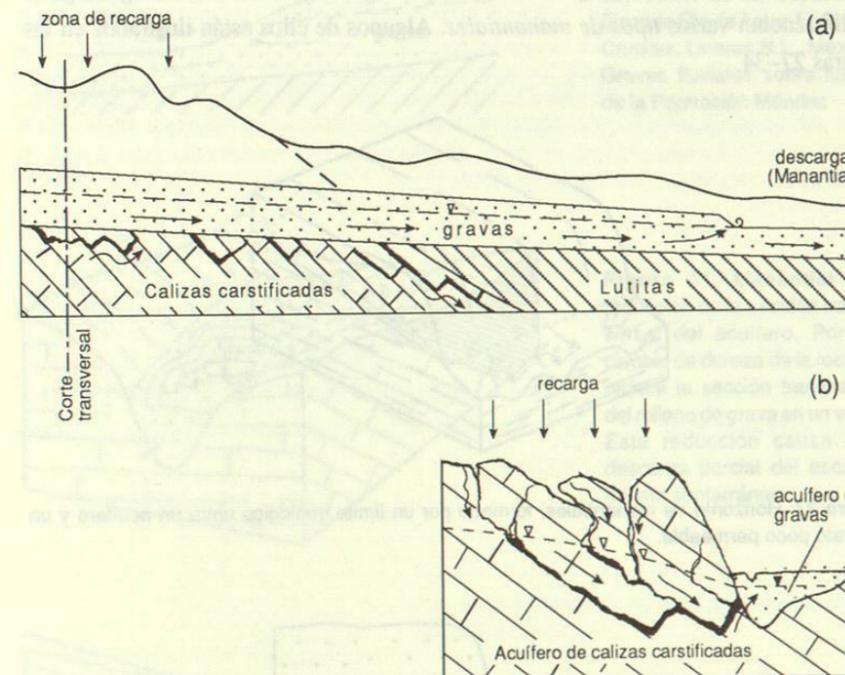
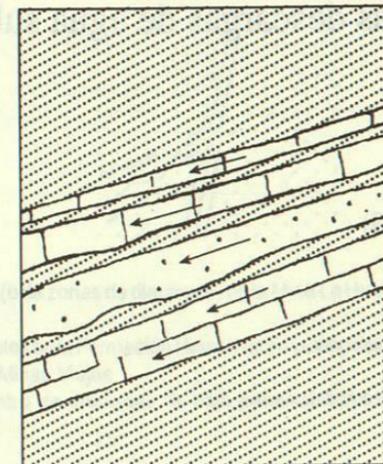
Cabe decir que al perforar un pozo demasiado profundo, que alcance al acuífero principal, el agua del piso colgado se podría perder hacia abajo a la zona no saturada del piso principal.

**Acuíferos de estratos múltiples:** Los complejos de estratos múltiples consisten en varios acuíferos individuales, más o menos bien separados por capas de permeabilidad baja y de espesor pequeño. Paquetes de este tipo pueden ser considerados como un acuífero de alta anisotropía vertical (figura 25). Acuíferos de estratos múltiples se encuentran p.ej. en el Terciario de la Planicie Costera del Golfo de México, conformado por capas alternantes de areniscas y lutitas.

**Sistemas de flujo de aguas subterráneas**

Un sistema de flujo de agua subterránea comprende la recarga, el flujo horizontal y la descarga del agua y corresponde al sistema hidrogeológico (pág. 8). El agua subterránea de un sistema de flujo puede pasar por varios acuíferos de tipo diferente, que tienen contacto entre sí (véase ejemplo figura 26a y b).

**Figura 25:** Acuífero de estratos múltiples. Consiste en un complejo de capas de permeabilidad elevada (p.ej. calizas, areniscas), separados por capas de permeabilidad baja y de pequeño espesor (p.ej. lutitas, pizarras)



**Figura 26:** Sistema de flujo de 2 acuíferos (carst indirecto). a) corte longitudinal, b) corte transversal. El sistema no es cerrado, ya que no se descarga totalmente en el manantial (a).

## Las descargas de agua subterránea

### Tipos de manantiales

El agua subterránea se descarga en manantiales. Según las situaciones hidrogeológicas se diferencian varios tipos de manantiales. Algunos de ellos están ilustrados en las figuras 27-34.

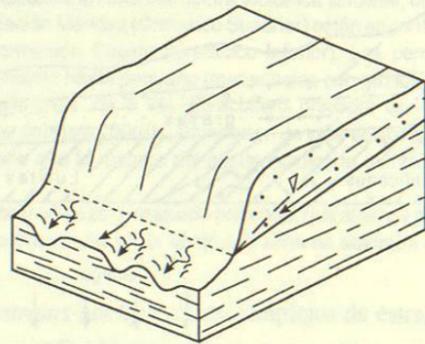


Figura 27: Horizonte de manantiales, formado por un límite geológico entre un acuífero y un sustrato poco permeable.

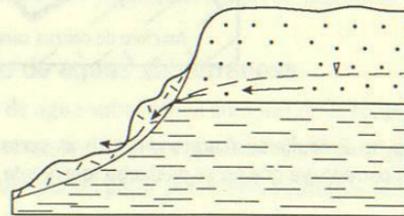


Figura 28: Manantial de escombros de talud. El agua no sale directamente del horizonte de manantiales, sino más abajo después de correr por escombros de talud.

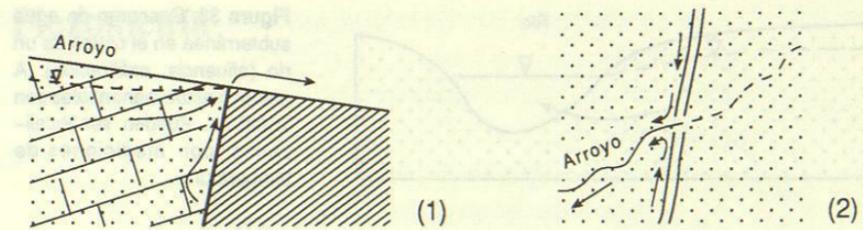


Figura 29: Dos ejemplos de manantiales de fallas (o de zonas de diaclasas) de la Mina La Huiche, Galeana, N.L., México.-  
 1: Falla impermeable: Areniscas permeables de la Formación Huizachal en yuxtaposición con yesos y arcillas de la Formación Minas Viejas  
 2: Falla permeable: Falla con dique dentro de areniscas de baja permeabilidad de la Formación Huizachal

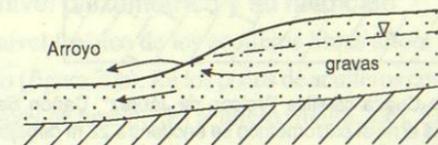


Figura 30: Manantial por depresión de la superficie. Ejemplo Ojo de Agua, Ejido Las Crucitas, Linares N.L., México. Gravitas fluviales sobre lutitas de la Formación Méndez

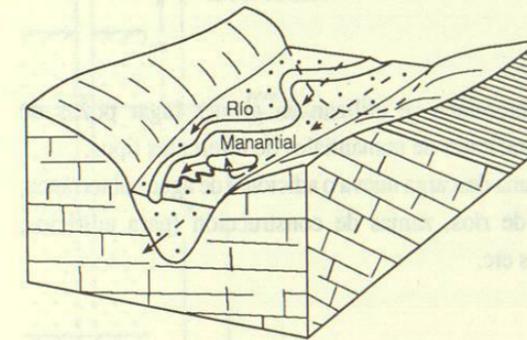


Figura 31: Manantial por reducción de la sección transversal del acuífero. Por un cambio de dureza de la roca se reduce la sección transversal del relleno de grava en un valle. Esta reducción causa una descarga parcial del escurrimiento subterráneo

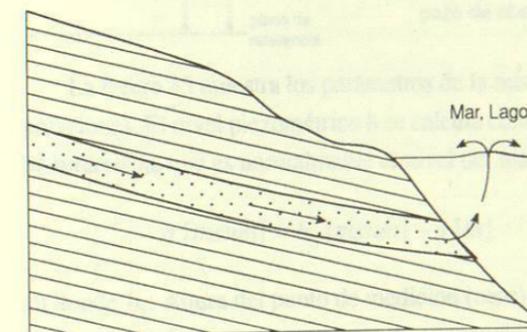
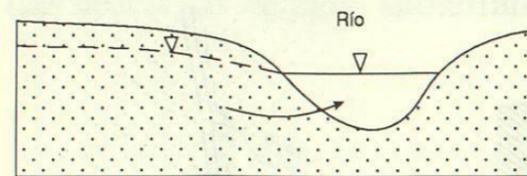
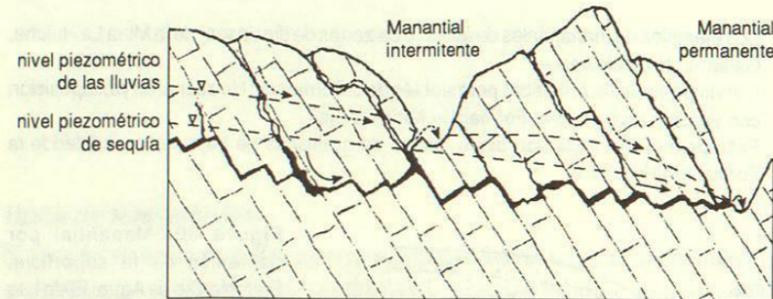


Figura 32: Manantial subacuático (submarino, sublacustre). El agua subiendo de manantiales submarinos de gran caudal se puede observar en la superficie.



**Figura 33:** Descarga de agua subterránea en el cauce de un río (efluencia, exfiltración). A menudo estos manantiales son invisibles. Pueden ser localizados por mediciones de temperatura.



**Figura 34:** Manantial intermitente. Ejemplo Cueva cárstica "Volcan de Jáurez", Cañón Santa Rosa, Linares N.L., México: Durante sequías el nivel piezométrico se encuentra 22 m debajo del nivel del arroyo seco. La zona de descarga se encuentra entonces probablemente en el valle vecino del Río Pablillo. Durante el tiempo de alta recarga el nivel freático sube y el agua subterránea sale de la cueva con un caudal de hasta  $> 1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Véase también figura 129 y foto de la portada.

**Descargas artificiales**

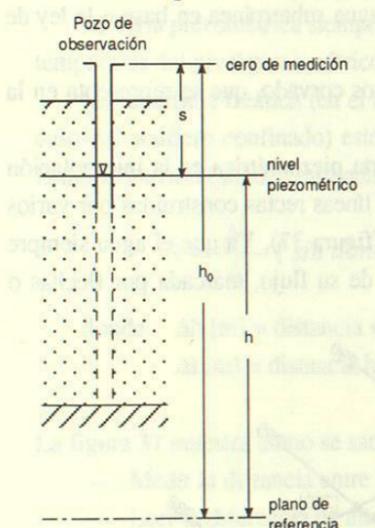
Para la exploración del agua subterránea se utilizan en primer lugar pozos de perforación y norias, así como captaciones de manantiales de diferentes tipos.

Muchas obras técnicas causan una descarga nueva o adicional de agua subterránea, como profundización de cauces de ríos, zanjas de construcción (para edificios, canalizaciones etc.), minas, túneles etc.

**Piezometría**

**El nivel piezométrico y su medición**

El nivel freático de los acuíferos libres aflora en los pozos y norias como *espejo de pozo* (figura 20a). En los pozos de acuíferos confinados el espejo de pozo corresponde al nivel de presión del acuífero (figura 20b). El nivel que se mide en pozos (pozos de observación, pozos de monitoreo o piezómetros) se llama el *nivel piezométrico*.



**Figura 35:** La medición del nivel piezométrico en un pozo de observación

La figura 35 muestra los parámetros de la medición del nivel piezométrico y sus notaciones. El nivel piezométrico  $h$  se calcula como la altura del nivel sobre un plano de referencia, que es normalmente el nivel del mar, según:

$$h \text{ [msnm]} = h_0 \text{ [msnm]} - s \text{ [m]} \tag{7}$$

en donde  $h_0$ : Altura del punto de medición (cero) sobre el plano de referencia (nivel del mar u otro plano de convención, p.ej. el cero de medición de un