para permitir su distribución hacia los consumidores sin más tratamiento. Los tristes incidentes de Love Canal, Nueva York, y otros más en los años 70 hicieron tomar conciencia de que el agua subterránea estaba contaminada con sustancias peligrosas procedentes de cientos de miles de depósitos enterrados con fugas, hoyas de residuos industriales, fosas sépticas de viviendas, vertederos municipales e industriales, escapes químicos accidentales, uso descuidado de disolventes, vertidos «nocturnos» ilegales, y uso generalizado de productos químicos en la agricultura. La contaminación de aguas subterráneas se convirtió en el tema ambiental de los años 80.

En respuesta a la presión creciente en favor de tomar alguna medida sobre los residuos peligrosos, el Congreso norteamericano aprobó la Ley de Respuesta Ambiental Integral, Compensación y Responsabilidad, (CERCLA: *Comprehensive Environmental Response*, *Compensation and Liability Act*) en 1980 para enfrentar el problema de los lugares ya contaminados. En 1980 y 1984, el Congreso reforzó la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA: *Resource Conservation and Recovery Act*), que controla la fabricación, transporte y utilización de las sustancias peligrosas de nueva producción. Estas dos leyes, la una reparando problemas del pasado y la otra ayudando a resolver los del futuro, han tenido una gran importancia. Los miles de millones de dólares que se han gastado intentando limpiar las aguas subterráneas y el suelo contaminados, junto con los altísimos costes de manipulación y utilización de los nuevos residuos peligrosos, han estimulado el interés por la prevención de la contaminación como tema medioambiental del futuro.

Una vez contaminada el agua subterránea es difícil, si no imposible, de recuperar. Un estudio reciente del Consejo de Investigación Nacional (NRC, 1984) estima que en los Estados Unidos hay entre 300.000 y 400.000 puntos en los que las aguas subterráneas o el suelo se encuentran contaminados y necesitan algún tipo de intervención. La mayor parte de ellos son originados por depósitos subterráneos de almacenamiento que presentan fugas. Los costes de limpiar estos lugares están en torno a los 100.000 dólares cada uno; otros más complejos están costando un promedio de 27 millones cada uno (U.S. EPA, 1993). Depurar todos ellos tiene un coste estimado de entre 480.000 millones y 1 billón de dólares (NRC, 1984). Estas enormes cantidades han puesto en tela de juicio el propósito de habilitarlos hasta el nivel de calidad de agua potable, especialmente cuando no es probable que las aguas que circulan vayan a tener ese uso.

## 5.9. Acuíferos

El agua procedente de la lluvia y de la nieve fundida fluye hacia los ríos y arroyos, y vuelve a la atmósfera por evaporación o transpiración o se filtra hacia el subsuelo para formar parte de las aguas subterráneas. Cuando el agua permea a través de las grietas o los poros del terreno y las rocas, pasa a través de la llamada *zona insaturada*, que se caracteriza por la presencia tanto de aire como de agua en los espacios intersticiales del suelo. El agua *vadosa*, de la zona insaturada o de aireación, no está disponible para el aprovechamiento humano, es decir, no se puede bombear, si bien las plantas ciertamente absorben el agua del suelo que se encuentra cerca de la superficie. En la *zona saturada* los espacios intersticiales están completamente rellenos de agua. El agua de esta zona se llama *agua subterránea*, y su techo es el *nivel freático*. Hay una zona de transición entre las dos mencionadas que es la *franja de capilaridad* en donde el agua sube por las pequeñas grietas

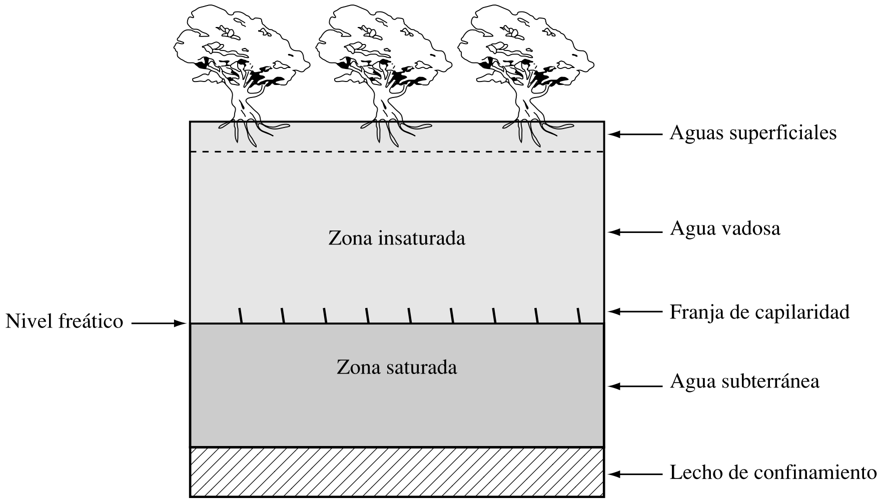


**FIGURA 5.26.** Clasificación de zonas subsuperficiales.

como resultado de la atracción entre el agua y las superficies rocosas. La Figura 5.26 ilustra esta distribución.

Un *acuífero* es una capa geológica saturada suficientemente permeable para permitir el flujo de agua a su través. Se asienta sobre una base o *lecho de confinamiento*, que es una capa relativamente impermeable que limita el movimiento del agua, o como se le puede llamar también un *acuitardo* (permeabilidad baja) o acuicludo (permeabilidad nula). Los dos términos, acuífero y lecho de confinamiento, no están definidos de una forma precisa y se usan a menudo con un significado relativo.

La ilustración de la Figura 5.26 muestra un acuífero libre. Un pozo perforado hasta la zona saturada de tal acuífero tendrá agua a la presión atmosférica en el nivel freático. El agua subterránea puede estar también contenida en un *acuífero cautivo* que es aquél encerrado entre dos capas de confinamiento, como se muestra en la Figura 5.27. Esta agua puede estar bajo presión, de modo que en un pozo perforado en dicho acuífero el agua alcanzará una altura mayor del nivel al que se encuentra confinada, en cuyo caso se denomina *pozo artesiano*. El nivel que alcanza el agua en un pozo artesiano se denomina *nivel piezométrico*. En algunas circunstancias el agua puede alcanzar la superficie del pozo e incluso superarla sin necesidad de bombeo, debido a la presión del acuífero confinado. En tal caso se llama *pozo artesiano surgente*. En la Figura 5.27 también se muestra una capa impermeable en medio de la zona insaturada, sobre la masa de agua principal. El agua que se filtra hacia abajo es atrapada por esta capa y crea un *acuífero suspendido*.

La cantidad de agua que puede almacenarse en un acuífero depende de la *porosidad* del suelo o la roca que lo constituye. La porosidad ($\eta$) se define como la razón del volumen de huecos al volumen total del material:

$$\text{Porosidad } (\eta) = \frac{\text{Volumen de huecos}}{\text{Volumen total}} \tag{5.39}$$

Mientras que la porosidad indica la capacidad de retener agua de una formación geológica, no es un buen indicador de la cantidad total de agua que puede extraerse de ella. Parte de

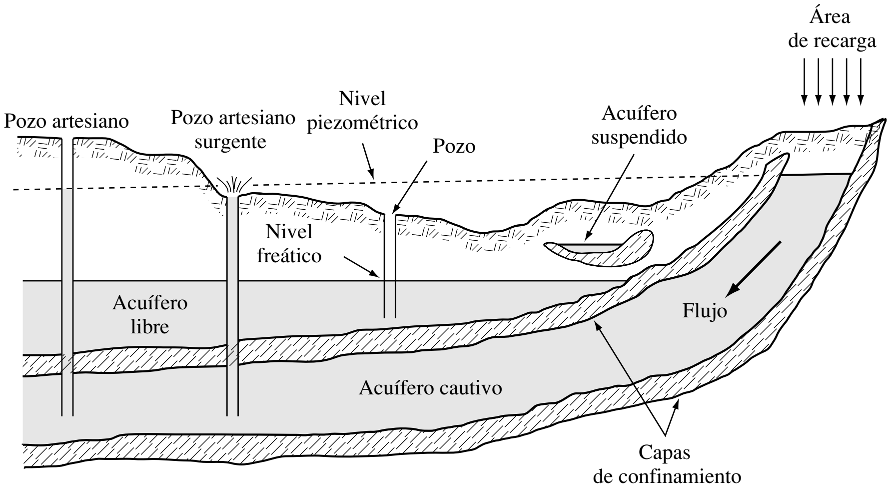


**FIGURA 5.27.** Acuíferos libres y cautivos (o confinados), un acuífero suspendido, un pozo y un pozo artesiano.

ésta quedará retenida como una película en la superficie de las rocas y en pequeñas grietas y aberturas. La cantidad de agua real que puede recuperarse de un acuífero libre por unidad de volumen se denomina el *rendimiento específico*, o la *porosidad efectiva*. Los valores de porosidad y de rendimiento específico se ven afectados por el descenso de presión que se produce cuando el agua va siendo extraída, así para calcular el rendimiento es necesario introducir otro término: el *coeficiente de almacenamiento*.

**EJEMPLO 5.10. Rendimiento específico**

Para un acuífero de arena que presenta las características dadas en la Tabla 5.11, ¿qué volumen de agua habría almacenada en una columna saturada de sección igual a 1 $m^2$ y una profundidad de 2 m? ¿Cuánta agua podría ser extraída de este volumen?

**Solución.** El volumen de material es 1 $m^2 \times 2$ m = 2 $m^3$, por lo que el volumen de agua almacenada sería:

$$\text{Volumen de agua} = \text{Porosidad} \times \text{Volumen de material} =$$

$$= 0{,}34 \times 2 \text{ m}^3 = 0{,}68 \text{ m}^3$$

La cantidad que puede extraerse realmente sería

$$\text{Rendimiento} = \text{Rendimiento específico} \times \text{Volumen de material} =$$

$$= 0{,}25 \times 2 \text{ m}^3 = 0{,}5 \text{ m}^3$$

**TABLA 5.11. Valores representativos de porosidad y rendimiento específico**

| Material | Porosidad (%) | Rendimiento específico (%) |
|---|---|---|
| Arcilla | 45 | 3 |
| Arena | 34 | 25 |
| Grava | 25 | 22 |
| Gravilla y arena | 20 | 16 |
| Arenisca | 15 | 8 |
| Caliza, pizarra | 5 | 2 |
| Cuarcita, granito | 1 | 0,5 |

*Fuente:* Linsley *et al*., 1992.

## 5.10. Gradiente hidráulico

En un acuífero no confinado la pendiente del nivel freático, medida en la dirección en que ésta es máxima, se denomina *gradiente hidráulico*. Es un concepto importante puesto que el flujo de agua subterránea va en la dirección del gradiente y a una velocidad proporcional a éste. Para definirlo de una forma más cuidadosa necesitamos introducir la noción de *nivel hidrostático*. Como se muestra en la Figura 5.28, el nivel hidrostático es la distancia vertical entre un nivel de referencia (normalmente el nivel del mar) y el nivel freático. Tiene dimensiones de longitud, se habla de «metros de agua» o «pies de agua». Si imaginamos dos pozos directamente en línea con el flujo de agua, el gradiente sería simplemente la diferencia de nivel hidrostático dividida por la distancia horizontal entre ellos. De forma análoga, el gradiente de un acuífero cautivo es el máximo valor de la pendiente del nivel piezométrico en el punto considerado.

Si el flujo en la Figura 5.28 va de izquierda a derecha en el plano de la página, el gradiente es

$$\text{Gradiente hidráulico} = \frac{\text{Diferencia de nivel hidrostático}}{\text{Distancia horizontal}} = \frac{h_2 - h_1}{L} \tag{5.40}$$

Adviértase que el gradiente es adimensional puesto que numerador y denominador tienen las mismas dimensiones. En cálculo infinitesimal lo podemos expresar como

$$\text{Gradiente hidráulico} = \frac{dh}{dL} \tag{5.41}$$

Mirando el flujo de agua subterránea de la Figura 5.28 nos podríamos imaginar *líneas de corriente* que mostraran la dirección de ésta y *líneas equipotenciales*, perpendiculares a aquéllas, que unen puntos de la misma altura hidrostática. La combinación de líneas de corriente y equipotenciales, crean una *red de flujo* bidimensional, como se muestra en la Figura 5.29. Si tuviéramos alineados dos pozos a lo largo de una línea de corriente como se muestra en la Figura 5.29, el gradiente sería sencillamente la diferencia de alturas dividida por la distancia entre equipotenciales.

La Figura 5.29 representa el caso particular de dos pozos situados en la misma línea de corriente. En el caso general es posible estimar el gradiente tomando medidas en tres pozos,

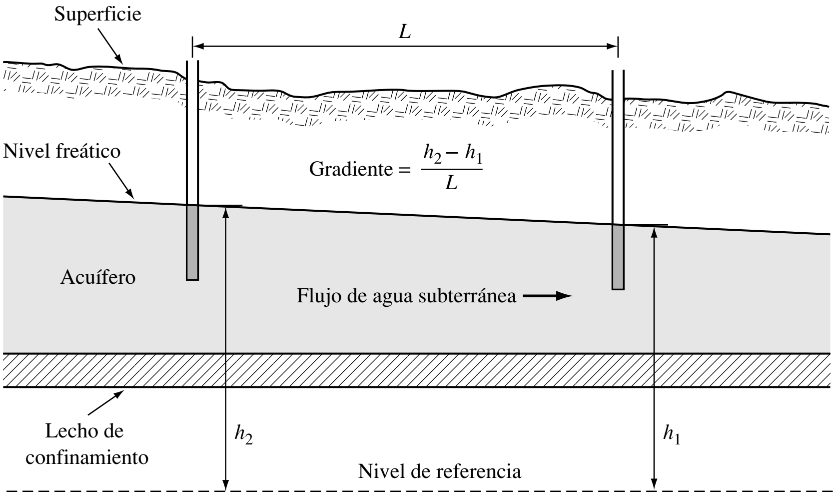


**FIGURA 5.28.** Nivel hidrostático y gradiente en un acuífero libre. El flujo de agua subterránea va de izquierda a derecha en el plano de la página, y el gradiente es $\Delta h/L$.

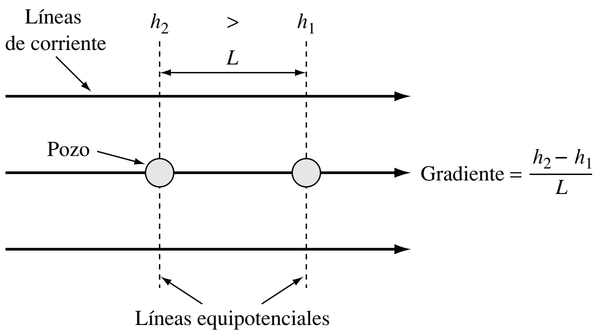


**FIGURA 5.29.** Una red de flujo bidimensional consistente en líneas de corriente y líneas equipotenciales. Si dos pozos coinciden en la misma línea de corriente, el gradiente es justamente $\Delta h/L$.

usando el siguiente procedimiento gráfico simple (Heath, 1983): comenzamos por hallar el nivel hidrostático de cada uno de los tres pozos, como se muestra en la Figura 5.30. Después seguiremos los siguientes pasos:

1. Dibujamos una recta entre el pozo que tenga el nivel hidrostático más alto y el que lo tenga más bajo, y la dividimos en segmentos iguales. Identificamos el punto que corresponde al nivel del tercer pozo.
2. Dibujamos otra recta entre el punto determinado en 1 y el tercer pozo. Esto es una *línea equipotencial*, que significa que la altura de la columna de agua en cualquier punto de esta línea es constante. El flujo de agua será siempre perpendicular a esta línea.
3. Dibujamos una recta perpendicular a la equipotencial a través del pozo con el nivel hidrostático más bajo (o más alto). Esto es una *línea de corriente*, que significa que el flujo es paralelo a esta línea.
4. Determinamos el gradiente como la diferencia de niveles hidrostáticos entre el nivel equipotencial y el nivel más alto o más bajo, dividido por la distancia entre la equipotencial y el pozo elegido.

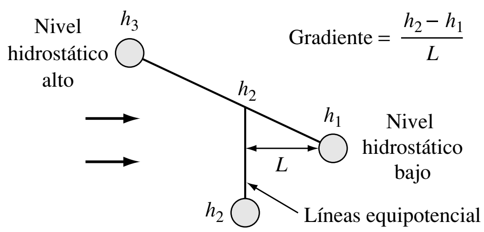


**FIGURA 5.30.** Utilizando tres pozos para determinar el gradiente: dibujamos una recta entre los pozos de mayor y menor nivel hidrostático y hallamos el punto de nivel igual al tercer pozo, que determina una línea equipotencial entre ambos.

---

**EJEMPLO 5.11. Estimación del gradiente hidráulico a partir de tres pozos**

Dos pozos están perforados a 200 m de distancia siguiendo una línea este-oeste. El pozo oeste tiene un nivel hidrostático de 30,2 m y el pozo este de 30,0 m. Un tercer pozo, situado a 100 m al sur del pozo este, tiene un nivel hidrostático de 30,1 m. Hallar la magnitud y dirección del gradiente hidráulico.

**Solución.** La localización de los pozos se muestra en la Figura 5.31(*a*). En la Figura 5.31(*b*), se ha dibujado una línea entre los pozos de mayor (oeste 30,2 m) y menor (este 30,0 m) nivel hidrostático, y la situación sobre esa línea del nivel correspondiente al pozo intermedio (sur 30,1 m). Se ha dibujado también la recta línea equipotencial de 30,1 m.

En la Figura 5.31(*c*), se han indicado también líneas de corriente perpendiculares a la equipotencial hacia el pozo este. La dirección del gradiente forma pues, un ángulo de 45º con el sentido positivo del eje de abscisas. La distancia entre la equipotencial y el pozo

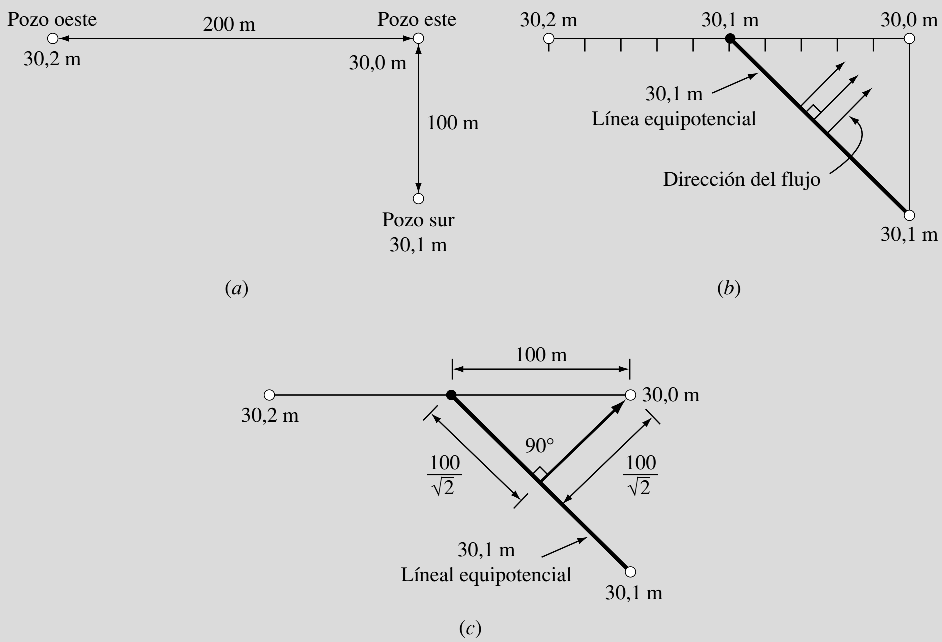


**FIGURA 5.31.** Cálculo del gradiente para el campo de pozos del Ejemplo 5.11.

este se determina geométricamente con facilidad y vale $L = 100/\sqrt{2}$. De modo que el gradiente es

$$\text{Gradiente hidráulico} = \frac{(30{,}1 - 30{,}0)\ \text{m}}{(100/\sqrt{2})\ \text{m}} = 0{,}00141$$

Obsérvese que el gradiente es adimensional.

## 5.11. La ley de Darcy

La ecuación básica que describe el flujo de agua subterránea fue formulada por el ingeniero hidráulico francés Henri Darcy en 1856. Basándose en experimentos del laboratorio donde estudiaba el flujo de agua a través de filtros de arena, Darcy concluyó que la velocidad de dicho flujo $Q$ era proporcional al área de la sección $A$ multiplicada por el gradiente hidráulico ($dh/dL$)

$$Q = KA\left(\frac{dh}{dL}\right) \tag{5.42}$$

donde

$Q$ = Velocidad del flujo (m$^3$/día).
$K$ = Conductividad hidráulica, o coeficiente de permeabilidad (m/día).
$A$ = Sección del flujo (m$^2$).
$\left(\frac{dh}{dL}\right)$ = Gradiente hidráulico.

La Ecuación (5.42) es conocida como la *ley de Darcy* para flujos a través de medios porosos. La ley de Darcy supone linealidad entre velocidad de flujo y gradiente hidráulico, que es una suposición válida en la mayoría de las circunstancias, aunque no en todas. No se cumple cuando el régimen es turbulento, lo que puede ocurrir en la proximidad inmediata de un pozo que está siendo bombeado. Tampoco es válida cuando el agua fluye a través de materiales de granulado extremadamente fino tales como arcillas coloidales, y debería usarse únicamente en medios completamente saturados. Depende asimismo de la temperatura. Se dan algunos valores de la constante de proporcionalidad $K$ en la Tabla 5.12. Debe apreciarse, sin embargo, que estos valores para la conductividad hidráulica son aproximados. La conductividad puede variar fácilmente incluso en varios órdenes de magnitud para un mismo material, dependiendo de la diferente ordenación o forma de sus partículas, así como de las cantidades de limo o arcilla presentes.

Los acuíferos que presentan la misma conductividad hidráulica en todos sus puntos se denominan *homogéneos*, mientras que los que difieren en este valor de unos lugares a otros son *heterogéneos*. No solamente puede variar la conductividad de un punto a otro sino que también puede hacerlo según la dirección del flujo. Es común, por ejemplo, tener conductividades hidráulicas más altas en dirección horizontal que en vertical. Los acuíferos que tienen la misma conductividad en todas direcciones se llaman *isótropos*, mientras que aquéllos en los que la conductividad varía son *anisótropos*. Aunque es conveniente matemáticamente considerar acuíferos homogéneos e isótropos, probablemente no existen.

**TABLA 5.12. Valores aproximados de conductividad hidráulica**

| Material | Conductividad gpd/ft$^2$ | Conductividad m/día |
|---|---|---|
| Arcilla | 0,01 | 0,0004 |
| Arena | 1.000 | 41 |
| Grava | 100.000 | 4.100 |
| Gravilla y arena | 10.000 | 410 |
| Arenisca | 100 | 4,1 |
| Caliza, pizarra | 1 | 0,041 |
| Cuarcita, granito | 0,01 | 0,0004 |

*Fuente:* Linsley *et al.*, 1992.

## EJEMPLO 5.12. Flujo en un acuífero

Un acuífero cautivo de 20 m de espesor tiene dos pozos de observación espaciados 500 m en la dirección del flujo. La diferencia del nivel del agua en los pozos es de 2 m (diferencia de nivel piezométrico). La conductividad hidráulica es de 50 m/día. Estimar la velocidad del agua por metro de distancia perpendicular al flujo (caudal).

**Solución.** La Figura 5.32 resume el planteamiento. El gradiente es

$$\frac{dh}{dL} = \frac{2\ \text{m}}{500\ \text{m}} = 0{,}004$$

Usando la ley de Darcy en un acuífero arbitrario de 1 m, nos da

$$Q = KA\left(\frac{dh}{dL}\right) = 50\ \text{m/día} \times 1\ \text{m} \times 20\ \text{m} \times 0{,}004 = 4\ \text{m}^3\text{/día por metro de ancho}$$

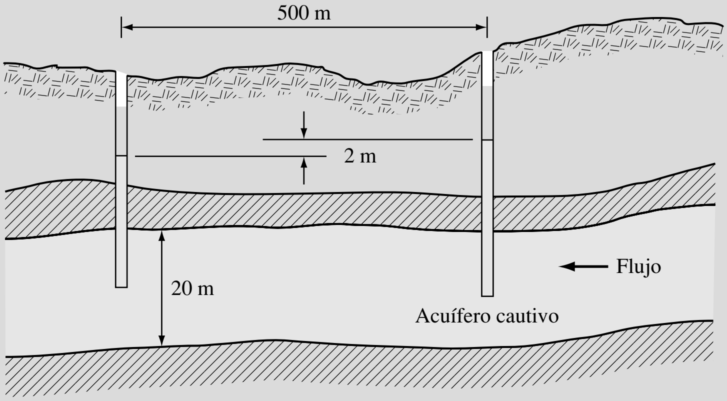


**FIGURA 5.32.** Ejemplo 5.12, flujo en un acuífero cautivo.

## Velocidad de flujo

A menudo es importante estimar la velocidad a la que el agua se mueve en el acuífero, especialmente cuando existe una pluma tóxica gradiente arriba de un pozo de suministro de agua. Si combinamos la ecuación que relaciona velocidad de flujo, velocidad y área de la sección,

$$Q = Av \tag{5.43}$$

con la ley de Darcy, podemos despejar la velocidad:

$$\text{Velocidad de Darcy } v = \frac{Q}{A} = \frac{KA\left(\dfrac{dh}{dL}\right)}{A} = K\,\frac{dh}{dL} \tag{5.44}$$

La velocidad dada en (5.44) se conoce como *velocidad de Darcy*. No es una velocidad «real» en sí misma, en esencia presupone que la toda la sección $A$ es capaz de dejar fluir el agua a su través. Puesto que gran parte de la sección está formada por sólidos, el área real a través de la cual fluye el agua es mucho menor y como resultado *la velocidad real del agua subterránea es considerablemente mayor que la velocidad de Darcy*.

Como se sugiere en la Figura 5.33, consideremos que la sección de un acuífero está compuesta de sólidos y huecos, con $A$ representando el área de la sección y $A'$ como el área de los huecos rellenos de agua. Sea $v'$ = la *velocidad lineal real promedio* (a veces llamada *velocidad de filtrado*), podemos reescribir (5.44) como

$$Q = Av = A'v' \tag{5.45}$$

Resolviendo para $v'$ e introduciendo una longitud arbitraria para el acuífero $L$, tenemos

$$v' = \frac{Av}{A'} = \frac{ALv}{A'L} = \frac{\text{Volumen total} \times v}{\text{Volumen de huecos}} \tag{5.46}$$

Pero recordemos que la razón del volumen de huecos al volumen total es exactamente la porosidad $\eta$ introducida en (5.39). Luego la velocidad real promedio a través del acuífero es la velocidad de Darcy dividida por la porosidad:

$$v' = \frac{\text{Velocidad de Darcy}}{\text{Porosidad}} = \frac{v}{\eta} \tag{5.47}$$

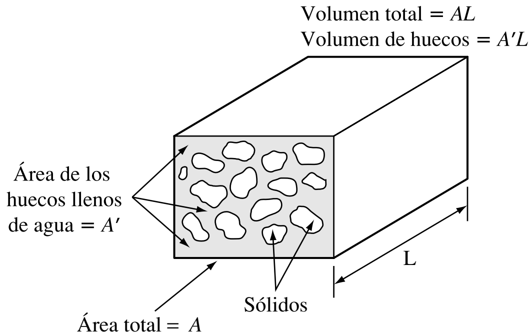


**FIGURA 5.33.** La sección capaz de dejar pasar el agua, $A'$, es menor que la sección total del acuífero $A$.

o, usando (5.44),

$$\text{Velocidad lineal promedio} \quad v' = \frac{K}{\eta}\left(\frac{dh}{dL}\right) \tag{5.48}$$

**EJEMPLO 5.13. Una pluma de agua subterránea**

Supongamos que el acuífero del Ejemplo 5.12 ha sido contaminado gradiente arriba de los dos pozos. Consideremos el pozo gradiente arriba como un pozo *de observación* cuyo propósito es facilitar la detección temprana de la pluma que se aproxima para ayudar a proteger al segundo pozo de agua potable. ¿Cuánto tiempo después de que el primer pozo se contamine es esperable que el agua del segundo lo haga también? Asumamos las siguientes tres afirmaciones (que podrán ser después cambiadas):

1. Ignoremos la dispersión o difusión de la pluma.
2. Asumamos que la pluma se mueve a la misma velocidad que el agua.
3. Ignoremos el efecto «arrastre» del pozo de agua potable.

El acuífero tiene una porosidad del 35%.

**Solución.** La velocidad de Darcy viene dada por (5.44):

$$\text{Velocidad de Darcy } v = K\frac{dh}{dL} = 50 \text{ m/día} \times 0{,}004 = 0{,}20 \text{ m/día}$$

La velocidad lineal promedio es la velocidad de Darcy dividida por la porosidad

$$v' = \frac{0{,}20 \text{ m/día}}{0{,}35} = 0{,}57 \text{ m/día}$$

así el tiempo necesario para viajar 500 m sería

$$t = \frac{500 \text{ m}}{0{,}57 \text{ m/d}} = 877 \text{ días} = 2{,}4 \text{ años}$$

Como se ilustra con este ejemplo, el agua subterránea se mueve muy lentamente.

# 5.12. Transporte de contaminantes

Debemos hacer unos comentarios a las premisas establecidas en el Ejemplo 5.13. La primera era que no había dispersión o difusión, de modo que la contaminación se desplazaba con un frente abrupto, el caso del llamado *flujo pistón*. La segunda consistía en que la pluma se movía a la misma velocidad que el flujo de agua. La tercera afirmaba que el agua potable no ejercía efecto de arrastre sobre la pluma, lo que haría que la velocidad de ésta creciese