Capítulo 5

Las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas constituyen una de las principales fuentes hídricas para el consumo humano. Los reservóreos subterráneos contienen un volumen de agua muy superior al disponible como agua dulce superficial. Por otra parte, en general, estas aguas no necesitan ser tratadas antes de su utilización, y en muchas ocasiones se las encuentra precisamente en el lugar donde se las necesita, haciendo innecesaria la construcción de infraestructuras de almacenamiento y largas cañerías. Una ventaja adicional reside en que las inversiones de capital pueden ser progresivas, adaptándose, por ende, mucho mejor a las condiciones de los países con menores recursos económicos.

En muchas áreas de alto consumo, como por ejemplo en las zonas urbanas y en algunos distritos de irrigación, el agua subsuperficial puede ser la solución más apropiada para las necesidades, debido a que puede proveer grandes volúmenes de buena calidad a bajo costo.

Sin embargo, la conveniencia del agua subterránea para el uso urbano o rural depende no sólo de los requerimientos, sino también de muchos otros factores hidrogeológicos, socio-culturales y económicos que pueden influir de diversas formas en la relevancia de las estrategias propuestas.

La diversidad de los acuíferos

Los sistemas hídricos subterráneos son extremadamente variados: algunos son altamente permeables, mientras que otros poseen permeabilidades muy bajas, casi nulas. Los hay porosos o fracturados; existen unos que albergan pocos miles de metros cúbicos y otros que contienen miles de millones. Hay reservóreos

de agua dulce o salobre, los hay prístinos y altamente contaminados, y finalmente, combinaciones diversas de todos los anteriores.

A pesar de esa gran variedad, el espectro se reduce considerablemente al suministrar agua a zonas de alto consumo.

Las principales limitaciones para la selección e implementación de alternativas de abastecimiento subterráneo, son generalmente de tipo económico. Ello se debe al carácter oneroso que insume el desarrollo de cualquier sistema de explotación de acuíferos: costos de exploración, de perforación, de extracción, de conducción, de almacenamiento y, en las zonas urbanas, de tratamiento y distribución.

Al decidir qué tipo de suministro se adoptará, es necesario comparar estos costos con los de otras fuentes de agua disponibles, su impacto en los geo y biosistemas, y a partir de ello, evaluar la calidad y renovabilidad del recurso.

Cuando el agua subterránea constituye la única fuente de agua disponible (como sucede en ciertas zonas áridas e hiperáridas, o en pequeñas islas) el costo pierde importancia como factor limitante.

Condiciones favorables para la utilización del agua subterránea

Las condiciones apropiadas para la explotación de los sistemas hidrogeológicos se dan solamente en ciertos lugares favorables. Los principales factores que pueden hacer posible o deseable la utilización de agua subterránea son los siguientes:

1. Proximidad al área de consumo.
2. Grandes volumenes disponibles.
3. Escasa profundidad y baja presión.
4. Elevado rendimiento hídrico (caudales).
5. Alta tasa de renovación.
6. Aceptable calidad del agua.
7. Bajo riesgo de efectos indeseables a causa del intenso bombeo (por ejemplo subsidencia, sismicidad).

En las páginas siguientes describiremos la forma en que las condiciones antes mencionadas pueden influir en la toma de decisiones para adoptar una fuente hídrica subterránea para el abastecimiento humano, en particular en áreas de fuerte consumo.

Proximidad al área de consumo

Uno de los mayores costos del suministro de agua es el asociado con su con-

En muchos lugares las aguas subterráneas son el único recurso hídrico disponible. Aquí una perforadora en acción en la cuenca media del Wadi Tathlith en Arabia Saudita.

ducción desde el lugar de producción al de consumo, en especial cuando el recorrido es ascendente, o debe atravesar obstáculos geográficos, como montañas o cañones. Desde ese punto de vista, cuanto más próximo se encuentre un acuífero a una ciudad, más atractivo resulta como recurso utilizable.

La situación ideal es aquella en que el acuífero subyace al área de consumo, sobre todo cuando se trata de un sistema artesiano. En estos casos, se reduce la red de conducción, se disminuyen o eliminan los gastos de bombeo y se minimiza el riesgo de contaminación desde la superficie. Estas condiciones son, o fueron, relativamente frecuentes en muchas zonas del mundo. No obstante, cabe señalar que la explotación excesiva de los acuíferos artesianos hace bajar el nivel de agua por debajo de la cota del pozo, con lo que la presión natural se pierde, obligando a aplicar bombeo para lograr la extracción.

Aún con el agregado de este costo, la conveniencia económica de contar

con un reservóreo de agua subterránea ubicado debajo de la zona de consumo supera holgadamente otros inconvenientes.

Un riesgo de este tipo de acuíferos es su posible vulnerabilidad a la contaminación, sobre todo cuando alguna parte de la recarga tiene lugar en zonas urbanizadas. En ciertos casos, el bombeo diferencial y/o el sobrebombeo pueden dar lugar a fenómenos de hundimiento superficial con los consiguientes perjuicios para las construcciones y la población[1].

Grandes volúmenes disponibles

Para que su uso resulte ventajoso en zonas de alto consumo, los acuíferos deben contener un volumen suficiente de agua como para ser utilizada durante un período prolongado. Consideremos el caso de los requerimientos de una ciudad de 100.000 habitantes que consuma 500 litros diarios de agua por persona. El consumo total anual de esta ciudad hipotética superaría 18 millones de m^3. Suponiendo una tasa de recarga anual promedio del orden del 10% del volumen almacenado, se necesitaría por lo menos un volumen 10 veces superior al consumo para satisfacer los requerimientos, sin afectar las reservas acuíferas existentes (180 millones de m^3). Para contener tal cantidad de agua, la formación hidrogeológica debe tener un volumen total varias veces mayor. En el caso de que el volumen de la unidad geológica sea diez veces mayor que el del agua, siempre en nuestro caso hipotético (o sea unos 1.800 millones de m^3), ello implicaría una porosidad efectiva del orden del 10%, cosa relativamente frecuente. Tal cantidad equivalente a lo que contendría, entonces, una formación de 10 m de espesor y 180 km^2 de superficie.

Consideremos los requerimientos hídricos de una gran metrópolis, como la Ciudad de México cuya tasa de consumo diario es de alrededor de 7 millones de m^3, equivalente a 2.500 millones de m^3 anuales[2]. El volumen utilizable (sin considerar la variación normal en los parámetros hidráulicos) deberá ser unas 150 veces mayor que el consumo de nuestra ciudad hipotética (para satisfacer sus requerimientos en el mediano y el largo plazo). Siempre a modo de ejemplo, esto significaría que una ciudad con los requerimientos de México podría ser abastecida por un acuífero de 2.700 km^3 de superficie y un espesor promedio de 100 metros. El acuífero del Valle de México, posee un volumen bastante menor y por tanto no es suficiente para satisfacer estas necesidades[3].

Desafortunadamente, los cálculos reales para conocer con cierta precisión los volúmenes de agua disponibles no resultan tan sencillos. De todos modos, los ejemplos citados utilizando cifras arbitrarias dan una idea del tamaño de acuífero necesario para satisfacer las demandas de agua de una gran ciudad.

Escasa profundidad y baja presión

Para poder ser utilizada en forma económicamente rentable, el agua subterránea debe ser económica y fácilmente accesible. Dado que los costos de las perforaciones se incrementan considerablemente cuando la profundidad de los acuíferos excede de unos pocos cientos de metros de profundidad, ésta constituye un factor principal al optar por un tipo de recurso hídrico. Los costos también son altos cuando aumenta la profundidad de los niveles piezométricos (niveles estáticos) y los niveles de bombeo (niveles dinámicos). En este último caso, los gastos operacionales pueden verse radicalmente aumentados debido a los costos de bombeo.

Con el incremento de la profundidad, hay una tendencia creciente hacia la compactación y consolidación de los sedimentos y hacia la disminución de la capacidad de almacenamiento y la conductividad hidráulica. Esto se traduce generalmente en una mayor mineralización del agua. Por esta razón, y debido a los costos crecientes con la profundidad, la mayoría de los acuíferos profundos resultan inadecuados para el suministro de agua en zonas de alto consumo.

Aún así, en algunos casos, los reservóreos profundos pueden contener agua potable de buena calidad y buenos caudales. Un acuífero excelente con estas condiciones es el que está localizado en las areniscas de Botucatu- Tacuarembó- Misiones, en la cuenca geológica Paranaense (abarcando parte de los territorios de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay). Su superficie supera ampliamente los 800.000 km^2 y su espesor es de varios cientos de metros (Montaño y Pessi, 1988; Kimmelman *et al.,* 1989).

Este acuífero, que ha sido denominado recientemente Sistema Acuífero Guaraní[4], contiene uno de los mayores reservóreos de alta permeabilidad y bajo nivel de mineralización del mundo. A pesar de su profundidad, que con frecuencia es superior a los 1.000 m, la presencia de un manto de roca basáltica dura suprayacente, cuya perforación es cara, la explotación se ve favorecida por sus altos niveles piezométricos, que con frecuencia originan condiciones artesianas[5]. Hasta hace poco, este acuífero había sido utilizado en forma limitada en las áreas en donde el acceso resultaba dificultoso y caro. En los últimos tiempos se han perforado algunos pozos de alto rendimiento para la extracción de agua con el fin de establecer estaciones balnearias termales. Existe cierta preocupación que una extracción excesiva haga perder el artesianismo y, por ende, aumenten significativamente los costos de extracción.

Alto rendimiento hídrico

Un elemento clave en la utilización de los acuíferos destinados a las zonas de alto consumo es el potencial para obtener elevados caudales en forma sosteni-

ble. El caudal de los pozos limita su número, su distribución y sus posibilidades productivas.

La principal propiedad intrínseca que determina la productividad de los pozos es la conductividad hidráulica o permeabilidad del acuífero. Las formaciones altamente permeables son las que ofrecen mejores condiciones para la construcción de pozos de alto rendimiento.

Alta tasa de renovación

Una de las características más importantes de un acuífero, que permite la explotación intensiva a largo plazo, es su renovabilidad. Esta puede ser definida como la capacidad de un acuífero de mantener su volumen a un nivel de extracción dado. La renovabilidad se relaciona con el balance entre los volúmenes de agua recargados y descargados[6] desde y hacia la superficie, y con el ingreso y egreso de agua desde y hacia las unidades hidrogeológicas contiguas.

En la mayoría de los casos, el factor principal para la renovabilidad de un acuífero es su volumen de recarga desde la superficie, la cual depende generalmente de la precipitación en el área de recarga o en las cabeceras de la cuenca. La tasa de recarga es asimismo función de la permeabilidad y del estado de la superficie del suelo, de las laderas, del desarrollo de la red hidrográfica, de la vegetación, de las estructuras artificiales y de la profundidad de la napa freática.

Algunos acuíferos tienen una alta tasa de renovabilidad debido a los altos niveles de precipitación elevados, a la presencia de áreas de recarga de gran superficie, o al drenaje lento o insuficiente, y pueden ser utilizados intensamente sin mayores consecuencias. En otros casos, dicha tasa es limitada, lo que los hace sensibles al sobrebombeo. La determinación de la renovabilidad de un acuífero es esencial para evaluar su potencial para explotación.

Calidad del agua aceptable[7]

La calidad del agua de los acuíferos debe ser adecuada para el fin perseguido. En las zonas de riego, debe tener una salinidad menor a los límites de tolerancia del cultivo irrigado. En las ciudades, la calidad del agua debe ser apropiada para el consumo humano. Para ello se requiere que tenga niveles de sólidos disueltos bajos (preferentemente menos de 300-500 ppm), que esté libre de micro-organismos (o que éstos se encuentren por debajo de los máximos establecidos por los estándares aceptables), que esté libre de otras impurezas (mezclas de gases orgánicos e inorgánicos, líquidos o sólidos en suspensión), que no posea excesiva radiactividad u otras características peligrosas para la salud. En algunos casos, la calidad del agua puede ser mejorada para adecuarla a los es-

tándares exigidos. Sin embargo, los altos costos del tratamiento de las aguas contaminadas pueden tornarlo prohibitivo.

La localización del área de recarga de un acuífero subyacente a un área densamente poblada o intensamente irrigada, lo puede hacer vulnerable a la contaminación por causas antrópicas (ya sea por los vertidos urbanos o por la recarga a partir de las aguas emanadas de los cultivos irrigados). Ello debe ser tenido en cuenta cuando se utiliza o planea utilizar un acuífero como fuente de agua potable.

En ciertos casos, la degradación de la calidad del agua puede estar asociada a la existencia de conexiones hidráulicas con acuíferos de menor calidad o con cuerpos de agua superficiales tales como mares y lagos salados. Un intenso bombeo puede promover la invasión de agua con características inconvenientes proveniente de arriba o abajo o lateralmente. Este fenómeno que en el caso de los acuíferos en contacto con aguas saladas es denominado "intrusión salina", constituye la causa principal de degradación en los acuíferos de las zonas costeras.

Bajo riesgo de efectos indeseables a causa del intenso bombeo

Los bombeos intensos pueden producir efectos poco deseables, como por ejemplo subsidencia del suelo o intrusión de agua con características inapropiadas proveniente de fenómenos de recarga inducida o de flujos subterráneos de acuíferos de baja calidad de aguas. A veces no se realiza la evaluación previa de éstos u otros problemas similares. En esos casos, el sobrebombeo da lugar a fenómenos de degradación tanto de los acuíferos, como del suelo suprayacente.

Las dificultades que resultan del sobrebombeo se relacionan con la desecación o el descenso del nivel de agua del acuífero. Los serios problemas de subsidencia que afectan a Bangkok, Ciudad de México, Shangai y Venecia derivan de la consolidación de sedimentos desecados luego de un intenso bombeo, excediendo la renovabilidad de sus acuíferos. Este fenómeno ilustra la dimensión del daño posible cuando las condiciones hidrológicas no resultan adecuadas para las tasas de bombeo y los volúmenes extraídos.

Acuíferos apropiados para zonas de alto consumo

La verdadera disponibilidad de las aguas contenidas en los reservóreos subterráneos puede resultar engañosa. Con frecuencia, los volúmenes hídricos subterráneos son sustancialmente mayores que los superficiales. En términos de agua dulce utilizable, la diferencia puede ser de varios órdenes de magnitud.

Sin embargo, la cantidad de agua subterránea disponible no debe ser medida en volumen, sino en su tasa de renovabilidad. Cuando los recursos subterráneos se gastan más rapidamente de lo que son recargados, los niveles, los costos de bombeo aumentan y, tarde o temprano, el recurso se termina.

Si juzgamos los acuíferos teniendo en cuenta su renovabilidad, la disponibilidad de las aguas subterráneas es del mismo orden de magnitud que las aguas superficiales. Por otra parte, conviene recordar que los acuíferos y las zonas de alto consumo pueden no coincidir espacialmente. Algunos grandes acuíferos están en zonas escasamente pobladas, o donde no se les necesita (pues hay suficiente agua superficial), y existen muchas áreas de alto consumo que no tienen acuíferos apropiados en sus proximidades.

A pesar de estas limitantes, el uso del agua subterránea ofrece muchas ventajas:

- Es menos vulnerable a la contaminación;
- Normalmente no requiere tratamiento;
- Puede ser explotada utilizando una estrategia modular, con menor inversión y mayor participación local;
- No requiere sistemas de distribución extensos y complejos;
- No se necesitan grandes tanques de almacenamiento (el líquido se almacena "bajo tierra").

A pesar que el agua subterránea puede ser una alternativa factible para proveer agua a las áreas de alto consumo, se debe poner especial cuidado para protegerla de la degradación a partir de fuentes externas de contaminación o por la sobreexplotación. Los acuíferos son menos vulnerables a la contaminación que las aguas superficiales, pero cuando son afectados el daño puede ser irreversible.

Ambientes hidrogeológicos explotables

Tan sólo unos pocos ambientes hidrogeológicos ofrecen volúmenes, rendimientos, renovabilidad, accesibilidad y calidad del agua necesarios para satisfacer los requerimientos de las áreas de alto consumo, ya sean urbanas o distritos de irrigación. Es por esta razón que la lista de formaciones hidrogeológicas de interés para estas zonas es mucho más corta de lo que aparece en los informes hidrogeológicos corrientes. Los principales acuíferos de alta producción, con aguas de características adecuadas para zonas de alto consumo son los siguientes:

1. Los acuíferos volcánicos
2. Los acuíferos aluviales detríticos (incluyendo las formaciones Terciarias de ese origen)

3. Los acuíferos carbonatados
4. Los acuíferos detríticos Pre-Terciarios

En las páginas siguientes presentamos una breve descripción de las características de los principales tipos de acuíferos desde el punto de vista hidrogeológico.

Los acuíferos volcánicos[8]

Las zonas de vulcanismo reciente están frecuentemente dotadas de numerosos sistemas hídricos subterráneos de alta productividad. Ello ocurre debido a la elevada permeabilidad de ciertos materiales volcánicos y a la presencia de cavidades, más o menos comunicadas entre sí, producto de la liberación de gases o circulación hídrica durante los procesos efusivos.

Las regiones volcánicas contienen espectros complejos de rocas magmáticas (lavas) de variada composición, petrografía y estructura, incluyendo materiales ácidos, neutros y básicos[9]. A ellas hay que agregar la presencia frecuente de formaciones piroclásticas (vulcano-detríticas) y depósitos aluviales y lacustres asociados.

Entre las rocas presentes en los distritos volcánicos se encuentran riolitas, traquitas, dacitas, andesitas, basaltos, tobas, argilitas y eolocineritas.

Desde el punto de vista petrográfico y estructural, las regiones volcánicas pueden ser sumamente heterogéneas, especialmente debido a la complejidad de la petrogénesis y tectónica asociadas con los procesos de tipo efusivo.

Principalmente como función de su contenido en sílice, el magma ascendente puede solidificarse antes de alcanzar la superficie, tal como suele suceder con los magmas riolíticos y traquíticos, o bien puede alcanzar la superficie y fluir ladera abajo, mientras se enfría y endurece (caso de los basaltos y andesitas).

Generalmente la efusión de lava está acompañada por degasificación, con eyección de diferentes productos magmáticos a la atmósfera. En el caso de los magmas ácidos, la presión gaseosa a nivel de las rocas solidificadas aumenta y pueden darse explosiones, que provocan una amplia eyección de fragmentos sólidos y materiales fluidos. Los fragmentos pueden ser grandes (bombas o escoria), medianos (lapilli) o cenizas. Estos materiales suelen transportarse ladera abajo, embebidos en fluidos calientes, como ser, varios gases calientes (de los cuales, por lejos, el más común es el vapor de agua), agua líquida (a menudo proveniente de erupciones y a veces de nieve derretida) y suelos que sufren licuefacción (generalmente formados por materiales volcánicos de erupciones anteriores).

Con frecuencia, las formaciones volcánicas sufren procesos de erosión hídri-

ca y son transportadas ladera abajo, donde pueden acumularse como depósitos aluviales o lacustres. En las laderas menos expuestas o de menor pendiente, los procesos de meteorización se desarrollan más rápidamente, de modo tal que los vidrios volcánicos y los pirocristales pueden transformarse en arcilla, con liberación de ciertos elementos químicos, entre los cuales se encuentran varios nutrientes aprovechables por las plantas. En los depósitos volcánicos sueltos, el suelo se forma con gran rapidez (en un lapso del orden de unos pocos años). En cambio, donde las rocas volcánicas se encuentran más compactas, este proceso es mucho más lento (decenas o centenares de años).

La formación de suelo es importante desde un punto de vista hidrológico, pues su desarrollo da lugar a una disminución de la permeabilidad provocado por la formación de arcillas a partir de los vidrios. Uno de los mayores obstáculos para la recarga de los acuíferos en las zonas volcánicas, y para el flujo vertical en general, lo constituye precisamente la presencia de paleosoles enterrados, producidos por la meteorización de los piroclastos.

Clasificación de las formaciones volcánicas

Las principales formaciones de rocas volcánicas son:

1. Aglomerados y brechas
2. Tobas por flujo de cenizas
3. Tobas por caída de cenizas
4. Flujos de lodo y tobas laháricas
5. Piroclastos aluviales y tobas retrabajadas
6. Tobas retrabajadas lacustres
7. Lavas

Aglomerados y brechas

Se forman cerca del pie de los volcanes como consecuencia de los aludes locales, del rodamiento de fragmentos rocosos de tamaño grande y mediano (bloques y lapilli) y de la caída de varios tipos de piroclastos en las cercanías de los conos volcánicos (incluyendo bombas, escorias mezcladas, piedra pómez, bloques, lapilli y cenizas de varios tipos y tamaño de grano). Desde una perspectiva hidrogeológica, los aglomerados y las brechas pueden resultar muy productivos, pero su limitada área reduce su uso como fuentes de agua.

Tobas por flujo de cenizas

Resultan del flujo de los piroclastos, que sufren procesos de licuefacción en presencia del agua o de gases volcánicos. Estos se acumulan en grandes volúmenes en valles y depresiones. Los materiales piroclásticos así formados pueden

estar compuestos de "lava viva" solidificada, fragmentos de "lava muerta" proveniente de erupciones anteriores, piroclastos de ese mismo origen, o fragmentos de roca de las paredes del sustrato cuando los fluidos volcánicos suben a la superficie.

Dichas tobas pueden estar o no soldadas, según su grado de consolidación. Las que no están unidas, a menudo contienen volúmenes utilizables de agua, debido a su espesor, área y porosidad efectiva, que puede alcanzar un valor promedio del 35% (Bedinger *et al.,* 1989[10]). Sin embargo sus rendimientos son en cierto modo menores que los de las tobas soldadas, en las cuales la porosidad es secundaria (relacionada con la fractura) y mucho menor (con valores de alrededor de un 3%).

La conductividad hidráulica (K) media para las tobas soldadas y fracturadas es de aproximadamente 1 m/día, en tanto que para las no soldadas y friables K es de 4 x 10^{-5}m,/día (Bedinger *et al.,* 1989). No obstante, los valores medios no siempre revelan el alto potencial hidráulico de estos depósitos, que resultan adecuados para el suministro de agua en zonas de alto consumo. Bedinger *et al.* (1989) encontraron valores de K del orden de 5 a 5 x 10^{-3} m/día para el percentil 83,5, con una porosidad efectiva que oscilaba entre el 4% para las tobas soldadas, con pocas fracturas, y el 33% para las no soldadas friables.

En resumen, las tobas, en especial las fracturadas, tienen un buen potencial hidrológico, con alto rendimiento. En los casos en que su volumen disponible sea suficiente, los mismos pueden ser usados como fuente para el consumo humano.

Tobas por caída de cenizas

Las tobas formadas por acción eólica pueden extenderse a lo largo de grandes superficies, acumulándose como una fina sábana sobre la topografía. Generalmente están compuestas de partículas piroclásticas finas, cuyo tamaño de grano decrece con la distancia desde la fuente volcánica. A pesar de su extensa superficie, su potencial como fuente de agua es limitado debido a que raramente exceden los 10 metros de espesor.

Flujos de lodo y tobas laháricas

Constituyen fenómenos catastróficos, que pueden ocurrir regularmente en ciertos lugares, originando importantes acumulaciones de sedimentos de escasa variedad por debajo de las laderas volcánicas. Estas formaciones pueden extenderse decenas de kilómetros desde los valles hasta las tierras más bajas a menor altura.

Cuando son sujetos a intemperización, los flujos de lodo y las tobas lahári-

cas producen suelos muy fértiles. También pueden contener abundante agua subterránea, adecuada tanto para el consumo humano, como para el riego, en aquellos casos en que su superficie y espesor resulten suficientes. Es por esa razón que las zonas en donde se encuentran estas formaciones suelen estar densamente pobladas, a pesar de que su localización puede representar una amenaza permanente para la población local. Por ejemplo, la ciudad de Armero, ubicada en el centro de Colombia, fue destruida en 1985 por un lahar producido por un repentino deshielo en las laderas del Nevado del Ruiz[11] a continuación de una erupción. Hubo más de 25.000 personas muertas, sepultadas bajo 48 M de m^3 de material sólido transportado en menos de 3 horas. El pulso principal tenía una altura de 11 metros al desembocar del cañon del río Lagunillas.

Varias otras ciudades de Colombia y otros paises situados en regiones análogas se encuentran en zonas de riesgos similares.

Piroclastos aluviales y tobas retrabajadas

Dado que la superficie de las tobas recientemente retrabajadas se encuentra desprovista de vegetación, éstas quedan expuestas a la erosión hídrica, y sus partículas son transportadas por los cauces locales ladera abajo, donde se acumulan en espesores variados. Los piroclastos aluviales de esta naturaleza se encuentran a menudo intercalados e interdigitados con otros acuíferos volcánicos. Estas formaciones pueden tener altos valores de conductividad hidráulica y contener acuíferos cuya explotaciónpuede ser posible. Cuando sus volúmenes y tasas de renovación son suficientes estos acuíferos pueden incluso suministrar suficiente agua como para satisfacer las necesidades de las áreas de alto consumo.

Tobas retrabajadas lacustres

Los lagos son comunes en las áreas volcánicas debido a que los cursos de agua existentes son interrumpidos a menudo por diversas acumulaciones volcánicas sobreimpuestas. En la mayoría de las regiones volcánicas pueden encontrarse lagos de diferentes tamaños y estadios de evolución. Su última etapa de desarrollo corresponde con la transformación de los mismos en llanuras lacustres. Los sedimentos lacustres son en general más finos que los aluviales. Es por ello que aquellas formaciones tienden a actuar como acuitardos (o casi acuiclusos) más que como acuíferos, de manera que su rendimiento hídrico normalmente es escaso a nulo.

Se encuentran numerosos ejemplos de lagos volcánicos en las tierras altas mexicanas (lagos de Texcoco y otros en el valle de México, lago de Pátzcuaro y Cuitzeo en Michoacán, lagos y humedades del valle de Toluca, etc.), en las

tierras altas de Guatemala (lagos Amatitlán y Atitlán) y en Nicaragua (lago Xolotlán, laguna de Asososca, etc.).

Lavas

Las lavas son rocas volcánicas primarias, formadas por solidificación del magma en condiciones atmosféricas o cuasi atmosféricas. La consolidación de las rocas volcánicas puede darse en el interior del volcán, como sucede en el caso del magma rico en sílice y de alta viscosidad, o afuera de éste, cuando el magma es pobre en sílice y de menor viscosidad, y que termina consolidándose bajo la forma de coladas de lava. Los magmas de composición intermedia pueden producir rocas de varios tipos. Los magmas riolíticos, traquíticos y dacíticos generalmente producen erupciones explosivas, en tanto los basálticos y andesíticos originan episodios volcánicos más tranquilos.

Las formaciones de rocas de coladas de lava son heterogéneas. Se forma una costra vidriosa de rocas sólidas en las superficies externas de rápido enfriamiento, y un núcleo más cristalino de materiales que se van enfriando lentamente hacia el centro y la base de la masa. Bajo la costra sólida a menudo quedan atrapadas burbujas de gas, produciéndose materiales muy porosos que contienen vacuolas y vesículas. En algunos casos estos espacios pueden estar interconectados, dando lugar a una alta porosidad efectiva, que facilita la circulación del agua (por ejemplo, alta conductividad hidráulica). En otros casos, las vacuolas y vesículas permanecen aisladas y entonces la circulación de agua se hace más difícil. La base de la colada incluye normalmente fragmentos de rocas, que crean muchas anfractuosidades y espacios vacíos, lo que produce un material solidificado altamente permeable.

Debido a estos procesos, la lava puede desarrollar una red de fracturas abiertas, generalmente interconectadas, que permiten el flujo de volúmenes significativos de agua.

En resumen, cuando la lava encierra grandes volúmenes de gas, está sujeta a intensos fenómenos de contracción o fluye a través de superficies rocosas sueltas, puede formar unidades hidrológicas de alta productividad. Por el contrario, cuando el contenido gaseoso es bajo, tal como sucede en la mayoría de los flujos basálticos, las fisuras por contracción son pocas y pequeñas o los fragmentos de rocas foráneas no son tomados del sustrato, el potencial hidrológico de la roca solidificada puede ser limitado. Tal es el caso de los basaltos del Planalto, meseta volcánica de la Serra Geral en el sudeste de Sudamérica), cuya productividad es relativamente baja.

La porosidad efectiva de los flujos de lava en varias áreas volcánicas de Norteamérica varía de un valor promedio del 15%, para las lavas cavernosas y fracturadas, al 1% para las densas a moderadamente densas.

Los valores promedio de conductividad hidráulica son de 0,5 m/día a 4 x 10^{-4} m/día respectivamente.

Renovabilidad del agua subterránea

Un importante elemento que facilita la explotación del agua subterránea en áreas volcánicas activas es la tasa de renovabilidad elevada. La misma se debe a la continua "juventud" de los sistemas hidrográficos del área. No hay tiempo para que se formen los valles fluviales dada la continua obstrucción de sus cursos por los flujos de lava, aludes, flujos de lodo, lahares, flujos de ceniza y otras acumulaciones.

Los lagos y las depresiones que se forman en estas regiones pasan a ser áreas de recarga de los reservóreos subterráneos.

En muchos acuíferos volcánicos la infiltración puede alcanzar valores superiores a la mitad de la precipitación. Desde este punto de vista, estas regiones comparten las características de las áreas kársticas: drenaje hidrográfico pobremente desarrollado, presencia de lagos o depresiones "de recarga", y flujos de fractura a través de fracturas abiertas, como en el caso de la lava y las tobas soldadas. Su principal diferencia con las áreas kársticas es la lentitud del proceso de disolución entre las fracturas.

Los acuíferos aluviales detríticos

Son aquellos contenidos en sedimentos detríticos de origen aluvial Terciarios y Cuaternarios. Se los encuentra en todos los continentes y en la mayor parte de las islas de cierto tamaño. Son los acuíferos más abundantes en superficie y en número. Puede hallárseles en zonas de altura, a veces por encima de los 4.000 metros de altitud, como sucede en el altiplano de Perú y Bolivia y en la meseta tibetana, o varios cientos de metros por debajo del nivel del mar, como en algunos márgenes continentales que han sufrido hundimientos, y en ciertas depresiones áridas (por ejemplo, el Mar Muerto).

Estos acuíferos presentan características muy variadas. Los hay pequeños, de unos pocos kilómetros cuadrados y escaso potencial, y muy grandes, con decenas de miles de quilómetros cuadrados y elevado potencial de producción.

La productividad de los pozos es igualmente variable. En algunos casos es de apenas unos pocos litros por minuto, mientras que en otros puede alcanzar cientos o incluso miles de litros por minuto.

No todos los acuiferos aluviales son capaces de suministrar en forma sostenida los volúmenes de agua de buena calidad requeridos para las zonas de alto consumo. De hecho, la mayor parte no puede hacerlo.

De todas formas, existen numerosas formaciones aluviales que contienen recursos renovables suficientes, como para satisfacer las demandas de agua de

muchas ciudades o regiones de irrigación del continente.

Hay algunas formaciones acuíferas aluviales, que no han sido clasificadas como tales en este capítulo, que también fueron depositadas como resultado de una acción aluvial. Las mismas han sido incluidas en apartados diferentes, respondiendo a otras características que resultan más significativas para definir sus propiedades y dinámica. Es el caso de los sedimentos aluviales de carbonatos, los depósitos aluviales de origen piroclástico, los sedimentos aluviales costeros interdigitados con depósitos marinos litorales y los conglomerados consolidados del Pre-Terciario y areniscas de origen aluvial

Composición y características de las formaciones aluviales

Las formaciones aluviales están compuestas principalmente por sedimentos detríticos de variado tamaño de grano y composición. Sus fracciones granulométricas incluyen gravilla, arena, limo, arcilla y otros dimensiones de grano intermedias. En general, cuanto mayor es la granulometría dominante, tanto más importante es la porosidad del material. Asimismo, los sedimentos aluviales con granulometría variada presentan una porosidad mayor que aquellos de tamaño de grano uniforme o promedialmente comparable.

Solamente los sedimentos más groseros (arena fina y gravilla) pueden contener volúmenes suficientes de agua y presentar una permeabilidad lo suficientemente alta como para originar acuíferos de alta productividad. Los valores de porosidad efectiva y conductividad hidráulica de los sedimientos groseros en los acuíferos aluviales oscilan entre el 12% y el 15% y 1 a 0,7 m/día. Las formaciones limosas y arcillosas no constituyen por lo general buenos acuíferos, sino que se comportan como acuitardos o acuiclusos, ya que poseen una conductividad hidráulica baja.

Las características señaladas no son exclusivas de los sedimentos aluviales, sino de cualquier tipo de sedimentos con similares propiedades granulométricas. De todos modos, la gran mayoría de los sedimentos detríticos que contienen acuíferos son de origen aluvial.

Clasificación de los acuíferos aluviales

Los sedimentos detríticos sufren considerables cambios con el tiempo. Cuanto más antiguo es un sedimento, más probable es que haya experimentado procesos de consolidación y diagenésis. Dichos fenomenos se encuentran a menudo, aunque no siempre, relacionados con la profundidad a la que el sedimento fue enterrado en algún momento de su historia geológica. Cuanto mayor sea la edad del sedimento, más grandes son las posiblidades de que haya sido afectado por procesos secundarios que modifican sus propiedades.

Los procesos de consolidación incluyen compactación general, hidrólisis de

los minerales ferromagnesianos y feldespáticos, formación de arcillas y otros minerales secundarios, y cementación con sílice, hidróxidos de hierro, óxidos o carbonatos. A mayor profundidad, donde la temperatura y la presión litostática aumentan por encima de ciertos valores, se dan otros tipos de fenómenos de naturaleza más diagenética, como por ejemplo, neoformación de arcillas y micas, anhidrización de sulfatos de calcio, formación de algunas sulfuros (como las piritas), cristalización de grafitos y magnetitas, y hematitización y goethitization de limonitas.

Todos estos procesos tienden a producir un descenso en la porosidad, en la conductividad hidráulica y en la capacidad de almacenamiento. A causa del retardo del flujo y del contacto más prolongado con las superficies minerales, aumenta el nivel de sales disueltas en el agua. Las altas temperaturas que se dan a gran profundidad también promueven dicha mineralización. Por lo tanto, como regla general, las formaciones detríticas más recientes suelen contener mejores acuíferos que las formaciones antiguas del mismo tipo.

Las rocas sedimentarias consolidadas tienen una porosidad intergranular y un flujo menor que las menos consolidadas pero, a veces la fracturación puede revertir esta tendencia. En esos casos, los acuíferos consolidados profundos pueden comportarse como acuíferos fracturados, similares a los que existen en las formaciones cristalinas.

Las principales formaciones aluviales detríticas

A los efectos de este capítulo hemos dividido las formaciones detríticas aluviales en tres categorías, de acuerdo con su edad:

1. Aluviones jóvenes, aún asociados con valles o cuencas fluviales actuales.
2. Aluviones más antiguos, que han sufrido cierta consolidación, generalmente de edad terciaria, y sólo a veces relacionados con los rasgos orográficos e hidrográficos actuales más importantes.
3. Rocas sedimentarias más antiguas de origen aluvial, generalmente Pre-Terciarios, sin asociación directa alguna con el relieve existente, y que a menudo han experimentado un grado relativamente alto de consolidación y cierta diagénesis.

Otro criterio clave para la clasificación de sedimentos aluviales es su geomorfología general. Los sedimentos aluviales del piedemonte andino son completamente diferentes de aquellos de los grandes llanos centrales de América del Sur. Los depósitos aluviales de las mesetas onduladas de los escudos son distintos de los sedimentos intramontanos andinos o de las cuencas de la sierra.

También hemos sudividido los sedimentos cenozoicos, en los cuales el actual relieve es todavía un factor, de acuerdo con su localización geomórfica. Las cuencas aluviales de origen terciario están comprendidas en este grupo, como

un sub-tipo separado de acuífero aluvial. Las rocas sedimentarias pre-terciarias son tratadas en una sección aparte, junto con otras rocas de edad similar, aunque de distinto origen.

Los acuíferos aluviales

Las formaciones aluviales que contienen acuíferos de mayor productividad son:

- las cuencas terciarias aluviales y molásicas
- las cuencas aluviales intramontanas
- los aluviones de piedemonte
- los aluviones de las llanuras
- los aluviones de escudos y plataformas
- los aluviones costeros

Las cuencas terciarias aluviales y molásicas

En el mundo existen numerosos depósitos aluviales antiguos, más o menos consolidados, que contienen acuíferos utilizables. Son los casos del complejo acuífero de la arenisca de Nubia en Africa nororiental y del acuífero de São Paulo en Brasil[12]. Estas formaciones suelen poseer gran espesor, superando los 200 o 300 metros, y contienen agua con un grado relativamente alto de mineralización, en especial en sus zonas más profundas. Dada su edad, con frecuencia se encuentran cementados con varios tipos de matrices (arcilla, sílice, carbonatos, óxidos e hidróxidos de hierro, sulfatos, etc.), que reducen considerablemente su porosidad real y efectiva y, por lo tanto, su permeabilidad.

No obstante, dado el gran volumen de estos depósitos, aun una pequeña proporción de la formación puede suministrar suficiente agua para el consumo urbano y el riego.

Cuencas aluviales intramontanas

Son valles aluviales localizados a lo largo de las regiones montañosas. Pueden ser relativamente angostos, con perfiles longitudinales de alto gradiente, laderas empinadas y llanuras aluviales angostas en sus bases, o bien estar formados por amplios valles, con pendientes longitudinales más suaves, y laderas laterales moderadamente inclinadas. Los valles estrechos y profundos son generalmente el resultado de una fuerte erosión del lecho del río, opuesta a la erosión de las vertientes, que tiende a producir valles más amplios y acumulaciones más abundantes en la base del valle.

Los depósitos aluviales de mayor espesor se forman en valles fluviales aguas abajo de las cuencas superiores de zonas semiáridas, áridas o periglaciares. Allí las laderas se encuentran desprovistas de vegetación y están, por lo tanto, sujetas a una severa erosión. En las zonas húmedas, los valles son angostos y pro-

fundos y los depósitos son de menor importancia. Sin embargo, aún en áreas que actualmente son húmedas, pueden encontrarse grandes depósitos aluviales, que han sido heredados de períodos geológicos más áridos.

Las acumulaciones de aluviones de gran tamaño y amplitud que se encuentran en regiones húmedas o subhúmedas son a menudo de origen tectónico. En los *graben* del Lago Valencia en la zona centro-norte de Venezuela (Peeters, 1968), los *graben* del Cauca en Colombia y los del valle longitudinal del sur de Santiago de Chile, existen importantes acuíferos aluviales de este tipo.

Ejemplos de valles de un tipo intermedio son los del Valle de Cochabamba en Bolivia (Von Borries, 1988; Ricaldi, 1992)[13] y el valle del alto Magdalena, cerca de Neiva, en Colombia. Los mismos son relativamente angostos y empinados, a pesar de su aparente origen tectónico. En cambio, los valles de Querétaro y San Luis de Potosí en México son amplios, de pendientes longitudinales y laterales relativamente suaves.

Los acuíferos de los valles intramontanos generalmente suministran agua subterránea de buena calidad, aunque en volúmenes no siempre suficientes como para satisfacer las necesidades de las ciudades o del riego. Cochabamba y Cali extraen grandes cantidades de agua, cuyo destino es urbano y para irrigación en el primer caso, y para riego de las plantaciones de caña de azúcar en el segundo.

Es frecuente que la disponibilidad de volúmenes significativos de agua superficial haya limitado el desarrollo de los recursos hídricos subterráneos, tal como ha sucedido en Cali y Neiva, en Colombia, ciudades en las cuales la mayor parte del agua proviene respectivamente de los ríos Cauca y Magdalena. Sin embargo, en otras situaciones la irregularidad del flujo de los ríos (Cochabamba) o la degradación del área superficial (Lago Valencia, cerca de la ciudad homónima, y Maracay, en Venezuela) han determinado que estas ciudades utilicen casi exclusivamente agua subterránea para consumo humano así como, en ocasiones, para el riego.

Aluviones de piedemonte

Estos acuíferos se dan al pie de las cadenas montañosas del ciclo alpino, como los Andes, los Alpes y los montes Himalaya. También se les encuentra en algunas áreas montañosas de los Escudos (por ejemplo en el Escudo Brasileño, en ciertas zonas del Escudo Africano, etc).

Las formaciones aluviales que contienen este tipo de acuíferos tienen características análogas. Generalmente constan de depósitos groseros (aglomerados o conglomerados arenas o areniscas gravillosas y distintos tipos de depósitos arenosos, con diferente grado de consolidación y contenido de limo y arcilla). Su origen está vinculado a la formación de abanicos aluviales en el punto de

salida de los valles montanos, cuando se extienden sobre el nivel de la llanura.

A nivel local, la presencia de bloques de rocas menos subsidentes, en relación con la llanura, o menos elevados, en relación con las montañas, cerca de los piedemontes, a menudo cubiertos por formaciones sedimentarias más antiguas, dificulta la acumulación sedimentaria.

En otros casos, las fallas activas y los intensos procesos de subsidencia pueden dar lugar la acumulación de depósitos aluviales muy espesos.

El espesor de estas unidades sedimentarias es variable, pero normalmente va creciendo en forma gradual desde las tierras bajas hacia las montañas. El máximo espesor de las formaciones aluviales groseras, que son las que generalmente contienen el agua, se encuentra desde unos pocos quilómetros hasta algunas decenas a partir del pie de la escarpa. En la cercanía de la escarpa estos depósitos apenas alcanzan unos pocos metros. Más lejos, si bien el espesor real de la secuencia sedimentaria en su conjunto aumenta, las formaciones aluviales se vuelven más finas, presentan conductividad hidráulica más baja y menor rendimiento de los pozos.

En América Latina, dos ejemplos de la situación antes mencionada se encuentran en Villavicencio (Colombia), y Santa Cruz (Bolivia).

Aluviones de las llanuras

Desde el punto de vista de su génesis, existen varios tipos de llanuras diferenciables:

1. Las llanuras tectónicas o de fosa
2. Las llanuras de explayamiento más allá del piedemonte montañoso.
3. Las llanuras lacunares o de mares interiores.
4. Las llanuras costeras
5. Las llanuras aluviales

Las llanuras tectónicas o de fosa se originan como resultado de la subsidencia de compartimiento de la corteza. Al comenzar el hundimiento se comienzan a depositar sedimentos (y a veces lavas) en la zona deprimida. Gradualmente se forma una fosa o graben, cuya base continúa hundiéndose hasta alcanzar una situación de estabilidad. Mientras la fosa está activa, la superficie sedimentaria se mantiene relativamente plana. Al cesar el movimiento descendente comienza a producirse una morfogénesis superficial apareciendo zonas disectadas y el relieve deja de ser plano.

En cierto modo, todas las llanuras tienen un componente tectónico, pero en el caso de las llanuras de fosa, el proceso está circunscripto a una zona relativamente bien determinada, marginada por fallas longitudinales y transversales. En algunos casos, la fosa puede asumir la modalidad de "tecla de piano",

delimitada por dos sistemas de fallas laterales (longitudinales) y solamente un sistema de fallas transversal (en la zona de mayor hundimiento).

La "cicatrización" de las fosas se produce gradualmente. En primer lugar cesan su actividad las fracturas externas, luego se van aquietando las internas y finalmente se estabilizan las franjas centrales. Este fenómeno es visible en muchas fosas tectónicas, como es el caso de la fosa del Rin en Europa, que separa los bloques montañosos de los Vosgos y la Selva Negra (Schwarzwald). La llanura del Rin se formó en el bloque hundido alargado entre ambos macizos. Las fallas más cercanas a los Vosgos y a la Selva Negra se estabilizaron a fines del Plioceno y principios del Pleistoceno. Más tarde ocurrió lo propio con un segundo sistema de fallas, ubicado en el interior de la fosa. En la actualidad existe actividad tan sólo en la zona central, en donde se dan aún procesos de hundimiento, que dan lugar a la formación de humedales, que localmente son denominados *ried*. El subsuelo de la llanura renana está formado por aluviones gruesos, resultantes, sobre todo, de la actividad fluvial de los ríos periglaciares durante las glaciaciones cuaternarias. Es en estos materiales que se encuentran los acuíferos más productivos.

Las llanuras del Pantanal de Brasil también se formaron como consecuencia del hundimiento de un bloque subregional. La fosa, de origen terciario, se fue rellenando con los sedimentos erosionados de las *chapadas* areniscosas contiguas.[14] En este caso se trata de una gran llanura inundable fundamentalmente arenosa. Durante los períodos áridos del Cuaternario, la zona se secó y la vegetación palustre desapareció. En su lugar se formaron campos de dunas resultantes de la remobilización de la arena aluvial. En tiempos holocenos, el clima se humidificó y la llanura se transformó en un gigantesco humedal de unos 150,000 km^2, atravesada por numerosos cursos de agua, y cubierta por una espesa vegetación palustre.

Debido al carácter permeable de las formaciones arenosas el agua circula a través de ellas, desarrollando acuíferos de muy alta productividad. En la práctica, debido a la abundancia de agua, estos acuíferos son explotados sólo localmente para los establecimientos agropecuarios.

Las llanuras de explayamiento se encuentran más allá de los piedemontes de las cadenas montañosas, en áreas rellenadas por los sedimentos que se generan en éstas.

Las vertientes que enfrentan las costas oceánicas, suelen dar lugar a llanuras costeras relativamente angostas (por ejemplo, el Tihama al suroeste de la península arábica, sobre la costa del mar Rojo). En la vertiente opuesta los relieves pueden extenderse por áreas muy amplias. En la propia península arábica los abanicos que descienden hacia el este están mucho más desarrollados (las

llanuras de explayamiento del Wadi Dawasir, y el Rub'al Khali).

En América del Sur, los explayamientos sedimentarios poseen dimensiones continentales extendiéndose desde los Llanos en el Delta del Orinoco hasta la Pampa más baja al sur de Buenos Aires. En gran medida, las partes más altas de estas cuencas fueron colmadas por depósitos aluviales durante las últimas épocas geológicas (Plioceno al Holoceno), aunque también lacustres y eólicos, transportados desde las tierras altas vecinas: sobre todo los Andes al oeste y al norte, y en menor grado, los Escudos Brasileño y Guayánico y el Planalto basáltico al este. Hacia el sur estos depósitos están afectados por el flujo irregular de corrientes de agua provenientes de las laderas de la zona semiárida de los Andes, que atraviesan la Pampa seca, y, por lo tanto, contienen horizontes intercalados de depósitos fluviales más groseros y más finos. A menudo incluyen sedimentos de granulometría fina y sales (halita, yeso y anhidrita) o lentes de sedimentos lacustres o eólicos. Hacia el norte, como el clima se hace más húmedo, los depósitos intercalados incluyen lentes más arenosos y finos y menor cantidad de horizontes de material más grueso, excepto donde se encuentran próximos a las montañas o relacionados con canales de depósitos en los ríos más grandes. Este tipo de sedimentación es variable según los sucesivos ambientes y cambios climáticos a nivel local, y a veces constituyen un registro de la actividad fluvial durante el Cuaternario.

Gran número de ciudades argentinas extraen parte del agua de uso municipal de estos acuíferos. Tales son los casos de Junín, San Nicolás y de varias municipalidades del área de Gran Buenos-La Plata (La Plata y Quilmes). Asunción del Paraguay, Rosario y otros pequeños centros urbanos de la Argentina obtienen parte del agua que consumen de las "arenas" del Paraná o formaciones correlativas, conocidas en la región del sur del Paraná como las Arenas Puelches (Fili, 1983; Herrero, 1983; Auge *et al.,* 1988)[15].

Similares depósitos aluviales, aunque desprovistos de sílice o carbonatos, se dan cerca de las llanuras de inundación del Orinoco, donde se originaron acumulaciones arenosas (principalmente de cuarzo) tanto a partir del transporte de sedimentos por el curso principal, como del suministro lateral de los afluentes que descienden del Escudo Guayánico y de las regiones montañosas del norte y del oeste. Dos de las más grandes ciudades de los Llanos (Ciudad Bolívar y Ciudad Guayana, en Venezuela) utilizan acuíferos aluviales de este tipo como suplemento al suministro de agua directamente del río (Menéndez y Araújo, 1972).

Las llanuras lacunares o de mares interiores se dan en las áreas deprimidas continentales, generalmente con drenaje endorreico, en donde se formaron lagunas o mares interiores. El proceso de desecamiento de los mismos da lugar a emergencia de áreas llanas, constituidas por sedimentos de fondo la-

custre-marino o litoral y localmente, estuárico y aluvial.

Existen abundantes ejemplos de llanuras de este origen. Los más importantes se encuentran en Asia. En el caso del Mar Aral el proceso de desecamiento se ha visto acelerado por la extracción de agua de los ríos Amu Darya y Syr Darya que son los principales, casi únicos, tributarios de este cuerpo de agua. Las zonas desecadas se han vuelto extensas llanuras. También se han formado grandes zonas llanas en las regiones costeras del Mar Caspio, especialmente

Tanto en el Mar Aral, como del Mar Caspio, las formaciones sedimentarias de las llanuras son relativamente finas con numerosos lentes limosos y arcillosos y las aguas, marcadamente salobres e incluso salinas (como en los salares del golfo Kara Bougaz al sureste del Mar Caspio). Un ejemplo similar se puede observar en algunos lagos desecados artificialmente en otras partes del mundo, como es el caso del lago de Texcoco en el valle de México, en donde los sedimentos lacustres son finos, con aguas subsuperficiales locales excesivamente alcalinas.[16]

Por esa razón la mayor parte de los depósitos aluvio-lacunares de este tipo no constituyen buenos acuíferos y su utilización se encuentra muy restringida.

Las llanuras costeras pueden formarse como resultado del aporte sedimentario de los ríos provenientes de las tierras continentales adyacentes, o por la emergencia de los fondos marinos sublitorales debido al ascenso tectónico o descenso del nivel del mar. En el primer caso, los acuíferos se encuentran asociados a las propias formaciones aluviales (sobre todo a los niveles y lentes de granulometría más gruesa) (ver Acuíferos costeros). En el segundo, las formaciones suelen tener una baja permeabilidad, con riesgos de intrusión salina, por lo que las posibilidades de explotación son limitadas.

Las llanuras aluviales ocurren a ambos lados de los cursos fluviales, como resultado de los procesos de sedimentación laterales durante los episodios de crecientes e inundaciones. Las formaciones aluviales formadas en estas condiciones son generalmente de granulometría fina y permeabilidad baja. Sin embargo, los lechos de los ríos suelen transportar materiales más groseros (por ejemplo, arenas o gravas) que dan lugar a la formación de lentes de mayor permeabilidad. En las zonas áridas las inundaciones son mucho más intensas y los elementos de mayor tamaño de grano pueden ser depositados sobre las zonas de desborde. Por estas razones, es posible encontrar numerosos niveles groseros aún en zonas de energía de relieve débil. Estas unidades sedimentarias pueden ser altamente permeables, y por ende, constituir excelentes acuíferos.

Aluviones de escudos y plataformas

Gran parte de las formaciones aluviales acuíferas se encuentran ubicadas en regiones de escudos y plataformas.

Es en el continente africano, que está formado en gran parte por tierras de escudo, en donde se desarrollan en mayor medida este tipo de unidades hidrogeológicas. Debido a la complejidad de la orografía y petrogénesis, los tipos de niveles aluviales acuíferos son muy variados. Los ríos que bajan de las tierras altas húmedas tropicales hacia las zonas áridas subtropicales solían transportar sales disueltas y en menor grado sedimentos. En la actualidad, debido a la deforestación de las cuencas de recepción, las aguas fluyen cargadas de aluviones que son depositados en los cursos más bajos de los ríos.

También se dieron fenómenos de aridificación análogos en otros tiempos geológicos y por esa razón se encuentran espesas formaciones aluviales en las márgenes, e incluso en el interior de los desiertos.

Estos procesos se pueden apreciar en el río Niger, que baja del Futa Djalon y se explaya en el actual territorio de Mali, más allá de Bamako, en lo que se conoce como el "delta interior del Niger", estudiado en el proyecto de investigación "Aérosols saheliens", apoyado por el CIID de Canadá en Mali, en el período 1987-1990, y en el río Nilo, cuyos dos tributarios principales descienden de las tierras húmedas de Uganda y de las montañas y mesetas de Etiopía, respectivamente.

Estos niveles aluviales contienen mucha agua almacenada y son utilizados regularmente para el abastecimiento de las poblaciones. Algunos sistemas hidrogeológicos de este tipo, en particular los acuíferos terciarios (por ejemplo, el acuífero de Nubia), tienen potencial para suministrar grandes volúmenes de agua, aunque, en muchos casos, su estudio y desarrollo, está pendiente.

En América del Sur, las formaciones aluviales cuaternarias se encuentran en las regiones de los escudos, tanto en los valles internos como en su periferia. Su desarrollo mayor se halla en los puntos de salida de las corrientes aluviales, actuales y antiguas, en los lugares en donde convergen con las tierras llanas interiores o las angostas llanuras costeras.

Los depósitos son variables en espesor, pero suelen ser menos potentes que los depósitos análogos de los valles intramontanos de la región montañosa y serrana y sus laderas bajas.

Los sedimentos aluviales de este tipo se encuentran particularmente bien desarrollados en las tierras semiáridas del nordeste brasileño a lo largo de los llanos costeros. También se les halla en este país como depósitos al pie de la escarpa de la Serra do Mar y su prolongación hacia el norte, y en los valles fluviales de la isla cristalina uruguayo-riograndense.

Estas formaciones suelen estar constituídas por arena o materiales gravillo-

sos cuarzosos o arcósicos, y son capaces de ofrecer rendimientos hídricos relativamente altos, debido a su porosidad y conductividad hidráulica. Varias ciudades del noreste de Brasil[17] y de los llanos costeros del sur del Atlántico utilizan agua proveniente de este tipo de acuíferos. En el noreste, el agua subterránea es ampliamente utilizada, considerando la carencia de agua superficial. A lo largo de la costa del sur, hay unos pocos ríos grandes debido a que las divisorias de aguas no se encuentran lo sufientemente alejadas del océano como para permitir un gran desarrollo del sistema fluvial (Geyh *et al.,* 1983). Los ríos costeros del Brasil tienen tendencia a ser cortos, con cuencas pequeñas y flujos medios más bien limitados, a pesar de los altos niveles locales que alcanza la precipitación. Ello ha promovido el uso del agua subterránea en estas áreas, lo que en ocasiones ha derivado en la intrusión o el sobrebombeo de agua salada en los acuíferos.

Algunos de los mayores valles aluviales de los estados de São Paulo y Minas Gerais también extraen agua de acuíferos aluviales, pero en menor medida, ya que pueden acceder a corrientes de agua superficiales de carácter permanente, existentes debido a la alta precipitación que se registra en la zona.

Los acuíferos de los depósitos aluviales de los ríos Guaíba, Maranhão, San Francisco y Tiête, en Brasil, y de los ríos Demerara y Essequibo, en Guyana, son perforados para el uso urbano. En Uruguay y en el estado de Río Grande do Sul (Brasil), los depósitos aluviales son relativamente angostos. Sin embargo, varias ciudades los utilizan. En Uruguay, varias de las pequeñas ciudades situadas en las proximidades del área metropolitana de Montevideo obtienen agua del acuífero arenoso-gravilloso de Raigón, que es de edad Pliocena-Pleistocena.[18] Este tiene, además, un potencial de uso para la propia ciudad de Montevideo. En el sur de Brasil, la ciudad de Pelotas obtiene agua de la Formación Graxahim, subyacente al río São Gonzalo, en tanto Uruguaiana utiliza un acuífero ubicado en los márgenes del Río Uruguay.

Los aluviones costeros

Se encuentran aluviones costeros en casi todos los continentes y grandes islas. Su origen está vinculado a los depósitos sedimentarios que han dejado los ríos en las proximidades de sus desembocaduras. Los ríos mayores suelen acarrear mayores cargas y por tanto, sus formaciones aluviales tienden a ser más potentes y extensas.

Se les encuentra en Asia (costas de Arabia, península indostánica, litoral chino), a lo largo de todas las costas africanas (por ejemplo en las zonas costeras de Tanzania, de Kenya, en el Magreb argelino y tunesino, en Libia, Egipto, etc), en Europa (llanura del Midi francés, en la Aquitania, en el norte de

Normandía, etc) y en Australia. Prácticamente en todos los casos estas formaciones contienen acuíferos utilizables para el abastecimiento urbano o la irrigación.

Las principales limitantes que se encuentran son el tamaño relativamente reducido de algunas de las cuencas y el riesgo de salinización debido a la intrusión del agua del mar.

En América Latina, las formaciones aluviales costeras que permiten obtener aguas subterráneas para el consumo están presentes en todas las áreas litorales, desde el noroeste de México (La Paz, Mexicali y Tijuana) a los llanos costeros del Pacífico en Sudamérica (Lima, Trujillo y Valparaíso) y la Pampa sureña (Mar del Plata, próximo a las islas cristalinas de Tandil y La Ventana), y desde el noreste de Brasil y Guyana (Fortaleza, Georgetown, Maceió y la isla de São Luis) a las regiones costeras del Caribe y del Golfo de México (Santa Marta en Colombia, Maracaibo en Venezuela y Veracruz en México, entre otras).

Dichos depósitos aluviales se encuentran a menudo interdigitados con sedimentos de origen litoral, que pueden también resultar ser buenos acuíferos, cuando están formados de materiales gruesos (playas, barras y bancos eólicos), con frecuencia de conductividad hidráulica ininterrumpida. Estos complejos reservóreos subterráneos suelen ser de fácil accesibilidad. Poseen agua en volúmenes relativamente abundantes y escasa profundidad.

Sin embargo, la mayor parte de los acuíferos costeros son susceptibles a la intrusión salina, que generalmente resulta del sobrebombeo, cuando la extracción se realiza muy rápidamente en pozos cercanos al mar.

Algunas de las ciudades que han experimentado problemas de salinización de sus pozos son, entre otras: Lima, en Perú; Santa Marta, en Colombia; Coro, en Venezuela; Rio Grande y Natal, en Brasil, y Mar del Plata, en Argentina. En el caso de Buenos Aires-La Plata, el problema de la salinización se debe al contenido de sales de una formación costera (ver también sección Acuíferos costeros).

Potencial de los acuíferos aluviales

Los acuíferos aluviales constituyen los acuíferos más comunes. Sus dimensiones, granulometría y composición petrográfica son muy variables, al igual que su porosidad y conductividad hidráulica. Sin embargo, promedialmente se trata de unidades hidrológicas muy productivas apropiadas para satisfacer las necesidades de las zonas de alto consumo. Los problemas están asociados mayormente con su carácter superficial, característica que, si bien resulta ventajosa desde el punto de vista económico, puede llevar a la contaminación de las fuentes superficiales. La utilización de los acuíferos aluviales requiere de un especial cuidado, pero su potencial para el suministro de agua a poblaciones y cultivos

es elevado.

Acuíferos carbonatados

Las rocas carbonatadas son abundantes en todo el mundo. Algunas se encuentran en los fondos marinos y cerca de la costa, a diferentes profundidades (lodos oceánicos orgánicos, corales, llanuras de marea y playas calcáreas). Otras están en ambientes lacustres, palustres o incluso aluviales. Su origen puede ser ígneo (carbonatitas) o pueden haber estado sujetas a transformaciones metamórficas (mármol).

Algunos acuíferos carbonatados contienen materiales de alta porosidad primaria, como las formaciones de corales, las lumaquelas, las calcarenitas y otras calizas detríticas escasamente consolidadas. La mayor parte de los acuíferos calcáreos, en cambio, basan su potencial en la porosidad secundaria, desarrollada a través de procesos de disolución química a lo largo de las fracturas, como sucede en las calizas y dolomitas compactas.

Desde el punto de vista hidrogeológico, las rocas carbonatadas suelen ser muy dinámicas. Con el tiempo, los procesos diagenéticos tienden a reducir su porosidad primaria. En la masa de la roca se van produciendo disoluciones graduales y recristalizaciones de los minerales carbonatados. Al mismo tiempo, a nivel de las fracturas, la circulación de agua tiende a disolver los minerales de las paredes, "erosionándolas" y formando cursos subterráneos, cuya dimensión se va incrementando. Dado que estos procesos pueden suceder simultáneamente, algunos acuíferos carbonatados tienen una porosidad primaria relativamente alta, todavía no completamente afectada por procesos diagenéticos, y una porosidad secundaria en desarrollo, en las fisuras.

Estas rocas pueden contener volúmenes considerables de agua en sus espacios intergranulares y redes de diaclasas. La acción del agua aumenta el tamaño de las fractura y, por lo tanto, tiende a facilitar su propia circulación. Estos mecanismos son conocidos como procesos kársticos, por lo que los acuíferos contenidos en tales formaciones se denominan acuíferos kársticos. Cuando los pozos o los manantiales se conectan con los principales cursos kársticos, estos acuíferos pueden resultar sumamente productivos y muy convenientes como fuentes de agua para su uso destinado al consumo de grandes ciudades y al riego.

No obstante, cabe señalar una serie de limitantes para la utilización de este recurso. En primer término, dado que los acuíferos carbonatados suelen ser discontinuos, no todas las perforaciones resultan productivas. En estos casos, los pozos pueden secarse rápidamente si no están en contacto con los sistemas de fracturas principales. En segundo lugar, si bien los rendimientos inmedia-

tos pueden ser impresionantes, a veces no permiten sostener la extracción de grandes volúmenes de agua. En muchos casos, sus reservóreos contienen menos agua, a menudo mucho menos, que otro tipo de formaciones que presentan menores rendimientos. Por último, otro elemento a tener en cuenta es el rápido flujo del agua subterránea a través de las fracturas abiertas. Este flujo veloz no permite la degradación de los contaminantes que pueden llegar de la superficie y arribar a las áreas de consumo sin tiempo de tomar medidas correctivas.

Aún a pesar de estos problemas, los acuíferos kársticos se encuentran entre las mejores y más confiables fuentes de agua para el consumo a nivel urbano.

Las formaciones carbonatadas están muy difundidas en todo el mundo. Son especialmente abundantes en casi toda Europa, desde la península ibérica a la región alpina. Son comunes a lo largo de la costa del Adriático, en el Jura y en muchas otras zonas del perímetro mediterráneo (por ejemplo el Magreb, en la cuenca del Mar Egeo).

En América Latina, los acuíferos carbonatados altamente productivos se encuentran sobretodo en el Caribe y en el Golfo de México. Hay sistemas kársticos en Barbados, en Cuba, en Jamaica, en Puerto Rico, en varias islas del archipiélago de Las Bahamas, en las proximidades de las penínsulas de Yucatán y Florida, en varias zonas del interior mexicano (Nuevo León, Tamaulipas, Coahuila, Guerrero, Morelos y en el propio estado de México) y en las áreas costeras del norte de América del Sur.

Bridgetown (Barbados), La Habana (Cuba), Montego Bay (Jamaica), Mérida (México) y Miami (EE.UU.) dependen exclusivamente del agua subterránea obtenida de los acuíferos carbonatados. Algunas otras ciudades que se abastecen de este tipo de acuíferos son: Nassau (Las Bahamas, donde también se utiliza agua desalinizada), Kingston (Jamaica) y varias de las mayores ciudades de Puerto Rico, como San Juan, Ponce y Arecibo.

Potencial de los acuíferos kársticos

Las formaciones carbonatadas de América Latina son heterogéneas por su composición y génesis, y poseen variada porosidad, grado de fractura y consolidación. Igualmente diversas son sus propiedades hidrogeológicas. Algunas de ellas son muy compactas, de baja porosidad y un volumen casi nulo de agua utilizable, como las calizas o dolomitas no fracturadas.

Por el contrario, existen numerosas formaciones carbonatadas de alta porosidad, intensamente fracturadas, que pueden suministrar grandes volúmenes de agua y tienen un excelente potencial para el abastecimiento de zonas de alto consumo.

En las cuencas molásicas de la Sierra Madre del Sur, en México (por ejem-

plo, en la cuenca del río Huapaca, cerca de Chilpancingo), en las laderas bajas de las tierras altas de Jamaica hacia la parte norte de la isla, en el sur de Puerto Rico y a lo largo de la costa de Venezuela, se encuentran acuíferos carbonatados altamente porosos. Los acuíferos kársticos típicos, con flujo de fractura, se dan en numerosos sitios del continente: en el sur de La Habana (Cuba), en Montego Bay (Jamaica), en la península de Yucatán, en la zona de Torreón-Gómez Palacio, México y en muchas otras zonas.

Estos acuíferos son muy vulnerables a la contaminación debido a la rápida circulación del agua en el interior del sistema que no permite una adecuada infiltración y purificación del agua de recarga, sobre todo cuando se encuentran localizados en las proximidades de las ciudades. En estos casos, los reservóreos subterráneos pueden ser fácilmente alcanzados por desechos de origen industrial y doméstico. En las zonas de agricultura también existen riesgos debido al uso de agroquímicos.

Estos problemas están presentes en todas las regiones kársticas del continente. Es así que los acuíferos urbanos de Kingston, en Jamaica, y Mérida, en México, están contaminados por desechos industriales y domésticos. Se cree que la intensa actividad agrícola que se desarrolla en el área de recarga del sur de La Habana puede perjudicar la calidad del acuífero kárstico, que constituye la principal fuente de agua de esa ciudad y de las áreas vecinas.

Los acuíferos carbonatados son muy sensibles a las interferencias antropogénicas, por lo que requieren de un manejo cuidadoso para su uso en forma continua.

Areniscas y conglomerados profundos generalmente antiguos (pre-terciarios)

Los principales reservóreos de agua subterráneas incluidos en rocas antiguas, están contenidos en las rocas de mayor permeabilidad, como las areniscas, los conglomerados y, en algunos casos, las calizas.

Las características de las areniscas y los conglomerados más antiguos, que las hacen apropiadas para su explotación hidrogeológica para las zonas de alto consumo, son:

- Gran potencia (varios cientos de metros).
- Suficiente extensión lateral (varios miles a decenas de miles de km^2).
- Que no se encuentren demasiado afectadas por macrofallas y pliegues, que pueden perturbar la continuidad hidráulica.
- La porosidad primaria debe ser por lo menos "media", en general superior al 5%; en algunos casos los flujos de fractura pueden compensar la reducción de la porosidad primaria.
- Conductividad hidráulica no menor a 0,1-1 m/día.

- Alto rendimiento de los pozos, por lo menos 100 litros/minuto, según las características de la inversión requerida.
- Profundidad no mayor a 1.000-2.000 metros.
- Niveles de agua estáticos y dinámicos relativamente superficiales (es deseable una presión suficiente como para que se originen pozos artesianos, pero a menudo se pierde con altas tasas de extracción).
- Tasa de renovación renovable, generalmente relacionada con volúmenes de recarga desde la superficie.
- Bajo nivel de mineralización del agua, por ejemplo, concentración de sólidos disueltos totales menor al 0,05%.

Las principales cuencas sedimentarias americanas, cuya continuidad hidráulica ha permanecido relativamente inalterada por eventos tectónicos, están localizadas alrededor de las regiones cratónicas de Sudamérica y en las llanuras centrales. Un ejemplo lo constituye la enorme cuenca sedimentaria del Amazonas, compuesta de relleno sedimentario pre-Cenozoico, cubierto por una secuencia cenozoica de gran tamaño. Debido a su profundidad, la baja densidad de la población de la zona, y la abundancia del agua superficial disponible, no ha sido necesario realizar perforaciones de producción de agua.

La segunda cuenca sedimentaria de América del Sur es la Cuenca del Paraná, que subyace al Río Paraná y sus tributarios. Es una fosa muy profunda, que alcanza los 6.000 a 7.000 m a lo largo de su eje central que se encuentra bajo el Río Paraná y Provincia de Santa Fe, en territorio argentino. Está compuesta por una impresionante secuencia de rocas sedimentarias que van desde el Paleozoico hasta el Cenozoico. Contiene numerosos niveles conglomerádicos y areniscosos, que albergan importantes volúmenes de agua utilizables tanto a nivel regional como local. Los depósitos devonianos están formados por formaciones más antiguas de arcosas y areniscas gruesas, y una unidad de areniscas más jóvenes. Su uso no resulta práctico dado que generalmente se encuentran a gran profundidad.

Los horizontes permo-triásicos también contienen formaciones detríticas groseras en su base. Se trata de conglomerados (tillitas) de origen glaciar (Itararé-San Gregorio) y de areniscas formadas en un ambiente fluvio-glaciar (Río Bonito-Tres Islas). Si bien estas unidades contienen agua, su uso es limitado debido a la profundidad que presentan en vastas extensiones y a la pobre calidad de la misma. La parte superior de la secuencia neo-gondwánica también está compuesta por areniscas (Estrada Nova), que son utilizadas como acuíferos a nivel local en el sur del Brasil y en Uruguay.

El relleno superior de la cuenca del Paraná es neo-gondwánico y está formado principalmente por areniscas eólicas (paleodesierto de Botucatu-Tacuarembó) y una espesa acumulación de flujos basálticos. Botucatu es una arenis-

ca de porosidad media a alta, pobremente consolidada. Alberga uno de los mayores acuíferos del continente, el cual se extiende desde Mato Grosso hasta Uruguay, con una capacidad de almacenamiento estimada del orden de 10.000 a 20.000 km^3 recientemente rebautizado "Sistema Acuífero Guaraní". Las aguas del Sistema Guaraní son de buena calidad y potables. El acuífero es capaz de producir altos rendimientos - a menudo de 500 litros/minuto - y es artesiano a lo largo de una gran extensión de su superficie. No obstante las señaladas ventajas, este acuífero es utilizado solamente cerca de su afloramiento, dado que la formación se encuentra cubierta, en la mayor parte de su área, por un manto basáltico de varios cientos de metros de espesor (de más de 1.000 m en algunos lugares). El mismo no sólo es sumamente improductivo desde el punto de vista hidrogeológico, sino que su perforación resulta difícil y cara (Da Cunha Rebouças e Fraga, 1988; Montaño y Pessi, 1988; Kimmelman *et al.*, 1988).[19]

La parte superior de la secuencia de la cuenca del Paraná comprende depósitos relativamente delgados de origen tardo-cretácico o cenozoico. Algunos de ellos contienen agua subterránea utilizable, por ejemplo la Formación Baurú, en Brasil, y las Formaciones Mercedes-Asencio , en Uruguay. Sin embargo, los acuíferos más usados son los sedimentos aluviales del Plioceno-Pleistoceno anteriormente descriptos.

Acuíferos costeros

Se los define simplemente por su ubicación cercana a la costa. Existen diferentes tipos, según la historia geológica particular de cada área. Muchos de ellos han sido el resultado de las interacciones geológicas de las formaciones marinas continentales y litorales. En algunos casos están compuestos exclusivamente de depósitos detríticos gruesos marinos o costeros, tal como sucede en las playas y las dunas arenosas, o por depósitos arenosos mezclados de agua superficial. Otros están formados por rocas carbonatadas marinas o litorales. Un número considerable de acuíferos costeros son aluviales, con o sin intercalación de formaciones costeras o marinas. En algunos casos son volcánicos y en otros están compuestos por rocas cristalinas ígneas o metamórficas.

A pesar de la variedad de características genéticas y sedimentológicas, su localización vecina al mar pone a estos acuíferos en estrecho contacto con el agua subterránea altamente salina contenida en los ambientes geológicos suboceánicos. Por esa razón, son reservóreos especialmente sensibles al sobrebombeo. Estas unidades hidrogeológicas están en posiciones topográficas bajas, a menudo por debajo o apenas por encima del nivel del mar, y se dan en las desembocaduras de cuencas fluviales actuales o antiguas, en estrecha asociación con los cauces existentes, en su punto de máximo flujo cerca del océano.

Los principales problemas, en cuanto a la utilización de estos acuíferos, son los vinculados con la salinización de sus aguas. Dada su baja densidad, el agua dulce flota sobre el agua más salada. Sin embargo, la diferencia en densidad es de solamente 2,5% y el horizonte relativamente delgado de agua dulce, que a menudo está por encima del agua subterránea más salada, puede encontrarse muchos metros por debajo del nivel del mar. Pero cuando un bombeo sin precaución extrae el agua dulce demasiado rápido, el agua salada tiende a reemplazarla desde abajo. Este ascenso de agua salada puede demorar cierto tiempo, pero suele ocurrir que cuando se perciben sus efectos ya es demasiado tarde para solucionar el problema.

Un gran número de ciudades latinoamericanas están situadas a lo largo de las costas del Atlántico, el Caribe y el Pacífico. Entre ellas podemos citar a Mar del Plata, en Argentina, que extrae agua de un acuífero aluvial sobre las costas del Atlántico; Natal y Recife, en Brasil; Santa Marta, en Colombia; La Habana, en Cuba, que obtiene toda el agua que consume de un acuífero kárstico de los llanos costeros del sur; y Lima, en Perú, donde aproximadamente un 40% del agua es extraído de un acuífero costero aluvial.

Referencias

1. Este fenómeno de subsidencia diferencial se ha dado en la ciudad de México y en menor grado en Toluca, México. La subsidencia generalizada (no diferencial) es problemática en las ciudades que se encuentran al nivel del mar, pues se producen inundaciones regulares. Dos ejemplos ilustrativos son Bangkok y Venecia. Este fenómeno fue estudiado en varias oportunidades a través de proyectos de investigación apoyados por el CIID de Canadá particularmente en las ciudades de México, Manila y Jakarta.

2. Se trata de cifras aproximadas con el solo fin de presentar un ejemplo ilustrativo. En realidad las cifras de consumo de la ciudad de México dependen del área considerada: el Distrito Federal, las zonas urbanizadas del Valle de México, todo el Valle, etc.

3. Para resolver el problema de abastecimiento de la ciudad de México se recurrió al sobrebombeo del acuífero, lo cual dio lugar al descenso continuo de sus niveles. Desde hace más de medio siglo la ciudad se ha visto obligada a "importar" agua de otras cuencas (las cuencas de los ríos Lerma y Cutzamala) (ver también capítulos 9 y 12).

4. Este acuífero regional fue "rebautizado" Sistema Acuífero Guaraní, a propuesta de Danilo Antón, en una reunión de hidrogeólogos de los países del Mercosur que tuvo lugar en Curitiba, Brasil, en mayo de 1996.

5. Estas condiciones reducen considerablemente los costos de extracción.

6. Tanto natural como artificialmente.

7. Ver, capítulo 17.

8. El Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID) de Canadá desarrolló y apoyó un interesante proyecto sobre acuíferos volcánicos en América Central que permitió obtener información abundante y valiosa sobre el tema. Este proyecto fue llevado a cabo a través de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica entre los años 1996 y 1998.

Algunos conceptos básicos en hidrogeología

En hidrogeología se utilizan un cierto número de conceptos básicos que deben ser conocidos para poder comprender las condiciones y dinamismo de las aguas subterráneas, tanto en la naturaleza, como dentro de los sistemas de extracción.

Algunos de ellos se definen a continuación:

Porosidad
Es la proporción de volumen no ocupado por material sólido. Se mide en porcentaje.

Caudal específico (specific yield)
Es el caudal proporcionado por un material saturado bajo la acción de la gravedad.

Permeabilidad
Es la capacidad de un medio poroso de trasmitir el agua. Se mide en litros por día por metro cuadrado de sección.

A modo de ejemplo, la arena fina tiene una permeabilidad de unos 10,000 litros por día y por metro cuadrado, y la arena gruesa, 50,000 litros por día y por metro cuadrado.

La Ley de Darcy
Relaciona la velocidad de flujo del agua subterránea con la pendiente de la napa y la permeabilidad. Se formula de la siguiente manera:

$$V = K\frac{dH}{DL}$$

En donde V es la velocidad del flujo, K es una constante característica del material (relacionada con la permeabilidad), H es el nivel del agua y D es la distancia entre los dos puntos que se consideran.

Coeficiente de almacenamiento
Es el volumen de agua liberado por unidad de superficie de un acuífero por unidad de cambio de nivel.

En general los acuíferos no confinados tienen un coeficiente de almacenamiento que oscila entre 0.01 y 0.35 y los confinados mucho menor (0.00001 a 0.001)

Transmisibilidad
Es la tasa a la cual fluye el agua a través de una sección vertical de ancho determinado (1 m, 1 pie) y profundidad igual a la del espesor saturado del acuífero.

Se mide en unidades de volumen (litros, metros cúbicos, pies cúbicos, galones) por metro de sección.

Tipos de Sistemas Geohidrológicos y sus Características

Tipo de sistema	Roca	Permeabilidad	Tipo de flujo	Velocidad de flujo	Recarga	Vulnerabilidad	Productividad	Almacenamiento
Acuíferos granulares	Areniscas, conglomerados	Media (en medio poroso)	Intergranular	Moderada	Cimas aplanadas, laderas suaves, pie de monte, llanuras aluviales (c.árido), depresiones	Moderada	Media a alta	Elevado
Acuíferos de fractura	Rocas ígneas, tenaces, metamórficas, volcánicas, sedimentarias tenaces	Baja a alta	En fisuras o diaclasas	Lenta a rápida	Interfluvios con escasa cobertura, áreas cubiertas de arenas, karst, depresiones	Baja a alta	Baja a alta	Bajo
Acuíferos de disolución	Calizas, capas salinas	Alta a muy alta	En fisuras, flujo hidrodinámico semi-libre o libre	Rápida a muy rápida, depende de pendient.	Cenotes, dolinas muy alta	Alta a muy alta	Alta a elevado	Bajo a
Acuitardos	Limos, margas limolitas, rocas tenaces moderadamente fracturadas	Baja	Intergranular o en fisuras	Lento a muy lento	Llanuras, cimas aplanadas, depresiones	Escasa a moderada	Escasa a moderada	Bajo a elevado
Acuicludos	Arcillas, argilitas, rocas tenaces no fracturadas	Muy baja a nula	En fisuras, o intergranular	Extremadamente lenta o nula	Llanuras y depresiones	Muy escasa a nula	Muy escasa a nula	Bajo a elevado
Agua superficial	Variadas, parcialmente relevante	No aplicable	Hidrodinámico libre	Rápido depende de la pendiente	No aplicable	Muy alta	Muy alta	Muy elevado

9. Las nociones de ácido, neutro y básico, son diferentes en química y geología. En geología se llaman rocas "ácidas" aquellas que contienen una proporción elevada de SiO_2, las rocas neutras un tenor medio, y las básicas un contenido relativamente bajo. Las principales rocas ígneas ácidas incluyen los granitos, granodioritas y riolitas. Las rocas básicas más comunes son los basaltos, andesitas y gabros.

10. Gran parte de la información sobre las características de los acuíferos volcánicos fueron tomados del trabajo de Bedinger et al, 1989; "Studies of geology and hydrology in the basin and range province, southwestern United States, for isolation of high-level radioactive waste-basin of characterization and evaluation".

11. Este evento catastrófico ocurrió en noviembre de 1985.

12. Este acuífero fue objeto de estudio en un proyecto de la Universidad de São Paulo en cooperación con la Universidad de Waterloo de Canadá. La investigación fue apoyada por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID) de ese mismo país en el período 1989-1994.

13. El acuífero fue estudiado durante el período 1988-1994 por un equipo multinacional coordinado por Victor Ricaldi de CREAMOS, Bolivia, con la participación de investigadores de Canadá (Universidad de Waterloo) y Brasil (Universidad de São Paulo). El proyecto fue apoyado por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID) de Canadá.

14. La región del Pantanal fue estudiada en el marco de un proyecto multinacional sobre la hidrovía (*Participative management of the Parana-Paraguay basin*) apoyado por el Centro Internacional de investigaciones para el Desarrollo en el período 1994-1997.

15. En la década de 1985-1995, el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID) de Canadá apoyó un conjunto de proyectos sobre hidrogeología urbana. Danilo Antón tuvo a su cargo iniciar y llevar a término el programa. Uno de esos proyectos tuvo entre sus objetivos el estudio del acuífero Puelche en el subsuelo de La Plata y Buenos Aires.

16. Dave Rudolph de la Universidad de Waterloo, Canadá, realizó un estudio de la hidrogeología de los sedimentos del lago Texcoco en coordinación con el Instituto de Geofísica de la UNAM. Estas investigaciones se llevaron a cabo en el marco de un proyecto patrocinado por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID) de Canadá.

17. La Universidad de Recife realizó un estudio en un acuífero costero de Pernambuco, con el apoyo del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID) de Canadá a principios de la década de 1990, que permitió ratificar las afirmaciones del texto.

18. Dinamige de Uruguay y la Université du Québec à Montréal realizaron un estudio integral de los acuíferos de la cuenca del río Santa Lucía, fundamentalmente constituidos por la formación Raigón. Esta investigación fue apoyada por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID) de Canadá.

19. El sistema Acuífero Guaraní fue estudiado en forma interdisciplinaria y multinacional en un proyecto apoyado por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID) de Canadá entre los años 1994 y 1998.