



## Gestión del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá.

ALBERTO ALVAREZ OSEJO

Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Apartado Aéreo 14490, Santafé de Bogotá, Colombia.

ALVAREZ O, A. (1997): Gestión del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá.- GEOLOGIA COLOMBIANA, 22, pgs. 81-101, Santafé de Bogotá.

**Resumen:** En la Sabana de Bogotá se explota el agua subterránea desde hace décadas; su uso se ha incrementado a partir de los años 80. La gestión del recurso hídrico subterráneo se debe hacer con un conocimiento adecuado del funcionamiento de los acuíferos, de los volúmenes recargados, almacenados y explotados, así como de los beneficios y efectos negativos que eventualmente puedan suceder. Con base en la información hidrogeológica existente se consideran algunos temas que permiten reiniciar los estudios hidrogeológicos para administrar el agua subterránea en esta zona del país. Se describen varios casos históricos, para ilustrar el desarrollo y administración de importantes acuíferos en el mundo.

**Palabras claves:** Agua subterránea, acuífero, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, rendimiento específico, explotación intensiva, recursos, reservas, recarga artificial, continuidad hidráulica.

**Abstract:** Ground water has been exploited in the Sabana de Bogotá for decades; its use has increased after the 80s. The management of the underground hydric resource must be done with enough knowledge of the aquifer system behavior, the water amount to be recharged, stored and exploited, as well as the benefits and negative effects that eventually could happen. Based upon the available hydrogeological information, some topics are considered that allow to start at once the hydrogeologic studies in order to manage the ground water in this section of the country. Several case histories, of extensive aquifers in the word, are described to enlighten its development and management.

**Key words:** Ground water, aquifer, transmissivity, storage coefficient, specific yield, intensive exploitation, resources, reserves, artificial recharge, hydraulic continuity.

### INTRODUCCION

En la Sabana de Bogotá, a partir de los años 80, se ha intensificado el uso de las aguas subterráneas para la floricultura, las industrias alimenticias e importantes fábricas de cerveza y bebidas gaseosas. La Sabana de Bogotá, junto con el Valle del río Cauca, son dos áreas, en la parte andina, con un desarrollo agrícola basado, en buena parte, en la utilización del agua subterránea. En nuestro país, este recurso se utiliza poco, posiblemente porque el agua superficial disponible para cada habitante es de unos  $300 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ , si se considera el agua susceptible de escurrir de  $9.200 \text{ mm/año}$  y  $35 \times 10^6$  habitantes. Según la NATIONAL GEOGRAPHIC RESEARCH & EXPLORATION (1993) Colombia ocupa el puesto 24 entre 146 países, por el agua disponible para cada habitante.

### PROPOSITO DE ESTE TRABAJO

Se desea divulgar los conceptos básicos sobre el funcionamiento de los acuíferos y los métodos de desarrollo

y gestión del agua subterránea en varios países, para su conocimiento y posible aplicación, principalmente en la Sabana de Bogotá.

Igualmente, presentar los métodos de trabajo para que la información disponible en el Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá realizado por Ingeominas (Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química) para la Car (Coporación Autónoma Regional de Cundinamarca) se pueda actualizar y complementar, y sea la base de los estudios sobre los acuíferos en la Sabana, que sirvan para realizar una buena gestión del recurso hídrico subterráneo.

### RESPUESTA DE LOS ACUIFEROS AL BOMBEO CON POZOS

Según THEIS (1940), en condiciones de equilibrio en un acuífero, toda el agua subterránea de importancia económica está en movimiento desde la zona de recarga a la zona de descarga. La velocidad es de unos centímetros a unos cientos de metros por año. Este movimiento ha tenido lugar

a través del tiempo geológico. Es evidente que el promedio de descarga de un acuífero, en el tiempo geológico reciente debe ser igual a la tasa de recarga. Pueden ocurrir pequeños cambios en la cantidad de agua en el acuífero, acompañados con cambios en los niveles, como resultado de un desbalance temporal en los procesos naturales de recarga y descarga, pero tales fluctuaciones se compensan entre sí, dentro de un año climático. Entonces, bajo condiciones naturales previas al desarrollo por pozos, el acuífero está en estado aproximado de equilibrio dinámico. La descarga por pozos es una nueva descarga sobrepuesta al sistema estable y debe ser balanceada por un aumento en la recarga del acuífero, o por una disminución en la descarga natural, o por una pérdida del agua almacenada en el acuífero, o por una combinación de estos factores.

La recarga a un acuífero puede ocurrir por percolación de la lluvia a través de los suelos hasta el nivel freático, o por filtración desde corrientes o cuerpos de agua superficiales, o por un movimiento vertical o lateral desde otro acuífero. La tasa de recarga puede ser tan alta, en periodos de lluvia, o siempre, que puede exceder la tasa a la cual el agua puede fluir a través de todo el acuífero. En este caso, el acuífero está totalmente saturado y la recarga disponible es desechada. Entonces, el nivel freático estará sobre la superficie o cerca a ella en las zonas de recarga, habrá muchos nacientes permanentes o temporales en las zonas bajas o podrá haber ciénagas, humedales o zonas con freatofitas que transpiren el exceso de agua. En este caso, es evidente que si se utiliza agua subterránea por medio de pozos, más agua irá al subsuelo y los nacientes perderán caudal, o habrá menos flujo base para los arroyos, o la vegetación silvestre disminuirá. Los pozos pueden, entonces, aumentar el volumen de agua hacia el acuífero.

Por otra parte, la posible tasa de recarga de agua puede ser menor que la tasa a la cual el acuífero puede transmitirla. En este caso la tasa de recarga está gobernada por: 1) La tasa a la cual el agua está disponible por la precipitación o por el flujo de los arroyos, o 2) por la tasa a la cual el agua puede percolar a través del suelo al nivel freático y así escapar a la evaporación. Por lo tanto, en las áreas de recarga no hay agua desechada por el acuífero, no importa el volumen recargado y no existe la posibilidad de compensar la descarga de los pozos aumentando la recarga, excepto si se hace un proceso de recarga artificial.

Los acuíferos tienen dos propiedades físicas fundamentales, que controlan el flujo a través de ellos. La primera es la facilidad con que transmiten agua a través de todo el espesor saturado; se mide con la *transmisividad*. La segunda es la cantidad de agua que puede ser extraída de su almacenamiento con un descenso en la carga hidráulica;

se mide con el *coeficiente de almacenamiento*, el cual tiene un valor grande para los acuíferos libres, equivalente al valor del rendimiento específico del material constituyente. Tiene un valor pequeño para los acuíferos confinados, en los cuales depende de la compresibilidad del acuífero y del coeficiente de elasticidad del agua.

Cuando un pozo se bombea, se causa una depresión o abatimiento de los niveles de agua, y hay un flujo convergente hacia el pozo, donde los niveles están más bajos que en cualquier otro sitio del acuífero. El agua converge hacia el pozo para reemplazar el agua extraída. Al aproximarse el agua al pozo, hay un aumento continuo de pendiente. La forma de la superficie resultante es un cono, conocido como el *cono de depresión*. La forma de este cono está determinada por la transmisividad y por el coeficiente de almacenamiento del acuífero. THEIS (1940) dedujo la fórmula que lleva su nombre; permite determinar la forma del cono de depresión y calcular la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento cuando se bombea un pozo, a una tasa constante, y se mide el abatimiento y el tiempo correspondiente.

En la fórmula de no equilibrio de THEIS (*op. cit.*), el radio del cono de depresión está determinado por el valor del límite inferior del integral, que incluye: el tiempo de bombeo, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento. La descarga del pozo no afecta el radio del cono de depresión, pero sí su profundidad (abatimiento) de manera directamente proporcional. El abatimiento también afecta directamente la tasa de bombeo. El valor del coeficiente de almacenamiento, por su relación con el tiempo, afecta la tasa de crecimiento lateral del cono, siendo éste inversamente proporcional a su valor. La transmisividad afecta tanto al radio del cono como a su profundidad. El radio del cono, para un tiempo dado, aumenta con un aumento en el valor de la transmisividad, y su profundidad es inversamente proporcional a su valor. Esta fórmula también permite entender que si se bombea un pozo a una descarga, que en el curso de 10 años produjera un abatimiento, al cual no es posible bombear más, si se reduce la descarga a la mitad, se podrá bombear durante unos 100 años para obtener el mismo abatimiento. Situación de especial importancia en la gestión del agua subterránea, cuando hay descensos marcados en los niveles de agua.

Desde el punto de vista de conservación del recurso hídrico subterráneo, THEIS (*op. cit.*) hace las siguientes observaciones: 1) Toda el agua descargada por pozos, es balanceada por una pérdida de agua en alguna parte. 2) Esta pérdida es siempre tomada en alguna cantidad, y en muchos casos en gran cantidad, del almacenamiento del acuífero. El reservorio del cual se toma el agua está limitado

por el tiempo, por la estructura del acuífero, así como por los límites materiales. Cualquier cantidad de agua extraída del acuífero, es directamente proporcional al abatimiento, el cual a su vez es directamente proporcional a la tasa de bombeo; por lo tanto las concentraciones grandes de pozos se deben evitar y se debe preferir una distribución uniforme de desarrollo sobre toda el área. 3) Después que ha pasado suficiente tiempo para que el cono de depresión llegue al área de recarga, la subsiguiente descarga por los pozos provendrá, por lo menos en parte, de un aumento en la recarga. Si tal recarga era previamente desechada por medio de la transpiración de las plantas no productivas, no hay pérdidas económicas. Pero si dicha recarga era desechada a través de nacientes o como flujo base, los derechos adquiridos sobre las aguas superficiales serán vulnerados. 4) En la mayoría de los acuíferos artesianos, se toma poca agua del almacenamiento. En estos acuíferos, debido a que el cono de depresión se extiende con gran rapidez, cada pozo, en corto tiempo, tiene su máximo efecto sobre todo el acuífero y obtiene la mayoría de su agua por un aumento en la recarga o una disminución en la descarga natural. Por lo tanto, tales cuencas artesianas deben tratarse como una unidad. En áreas con acuíferos libres, donde el bombeo se hace a grandes distancias de las localidades de toma o de salida de agua, los efectos del bombeo de cada pozo, después de un tiempo considerable están confinados a radios pequeños y el agua es tomada del almacenamiento en las cercanías del pozo. Por consiguiente, estas grandes masas de agua no pueden considerarse como una unidad para la utilización del agua subterránea. Deben, entonces, promulgarse medidas adecuadas de conservación para tales extensos acuíferos integrados por pequeñas unidades, y se debe tratar de limitar el desarrollo de cada unidad. 6) El desarrollo ideal de cualquier acuífero, desde el punto de vista de su máxima utilización para el abastecimiento de agua, podría hacerse bajo los siguientes puntos: a) Los pozos deben distribuirse tan uniformemente como sea posible en toda el área del acuífero. Al hacerlo, el descenso del nivel del agua en cualquier lugar sería el mínimo, y el período de desarrollo del acuífero se prolongará. b) La cantidad de bombeo en cualquier lugar debe ser limitada. Para los acuíferos libres, con un área comparativamente pequeña, y para la mayoría de los artesianos, hay un rendimiento seguro perenne equivalente a la cantidad de recarga desechada y de descarga natural posible de utilizar. Si esa cantidad no se sobrepasa, los niveles de agua conseguirán finalmente un estado de equilibrio. Si es excedida, los niveles de agua continuarán declinando.

En los Estados Unidos se postuló el concepto de *rendimiento seguro*. Lo definió MEINZER (1920, en KAZMANN 1965), como la tasa factible de extracción de agua del

acuífero que puede mantenerse permanentemente para uso humano. Posiblemente se trató de aplicar, pero fue abandonado a petición del USGS (KAZMANN 1965, p. 161), como un concepto no viable en hidrología.

Sin embargo, según CUSTODIO & LLAMAS (1976, p. 2265 - 2266), el Manual sobre Gestión y Administración de Acuíferos Subterráneos, publicado por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) en su edición revisada de 1972, contiene una serie de definiciones que es pertinente citar, a saber: 1) *Rendimiento permanente* ("sustained yield") es el rendimiento mínimo de extracción que se puede mantener en cualquier condición de caudal y temperatura del río (se refiere a un acuífero conectado con un río) por un determinado campo de pozos que exploten los acuíferos aluviales asociados. 2) *Rendimiento perenne diferido* ("deferred perennial yield") aplicable cuando se utilizan las reservas (almacenamiento), y el descenso de niveles consiguiente no produce efectos marginales indeseables. Se extrae agua a mayor ritmo que el rendimiento permanente a fin de desarrollar económicamente una región hasta que su potencial permita traer agua de zonas más lejanas. Es lo que se llama *sobreexplotación planificada* ("planned overdraft"). 3) *Rendimiento perenne máximo*, es el máximo rendimiento permanentemente disponible si todas las aguas y métodos de recarga se utilizan. Es función de una explotación racionalizada del recurso hídrico en conjunto.

CUSTODIO & LLAMAS (1976, p. 2029) añaden el concepto de *explotación óptima* ("optimal yield"), dado por BEAR & LEVINEN 1967, donde se tiene en cuenta, para la explotación racional de las aguas subterráneas, la posibilidad de incorporar las reservas existentes y los condicionamientos de la demanda y su evolución, en vez de únicamente aquellos recursos permanentes.

## CASOS HISTORICOS

Se resumen a continuación algunos casos históricos sobre los métodos de estudio y gestión del agua subterránea en varios países, mediante el desarrollo de importantes sistemas acuíferos. En cada uno de ellos se sabe qué se está haciendo, porque la explotación intensiva de los acuíferos se ha programado teniendo en cuenta los beneficios que produce el agua subterránea y también los daños o aspectos negativos esperados, a los cuales se dan soluciones. Sucede lo contrario en la Sabana de Bogotá, donde hay desconocimiento del funcionamiento de los acuíferos explotados desde hace varias décadas.

## Estados Unidos

En los Estados Unidos, hidrogeólogos del USGS, entre 1978 y 1995 (JOHNSON 1997), por mandato del Congreso, realizaron el estudio cuantitativo de los principales sistemas acuíferos con el programa Análisis Regional de los Sistemas Acuíferos "RASA" ("Regional Aquifer-System Analysis"). Los resultados se han consignado en más de 130 publicaciones del USGS enumeradas en WEEKS *et al* (1988). El objetivo de RASA fue: 1) Proporcionar la información hidrogeológica necesaria para evaluar los efectos de la utilización continua del agua subterránea; y 2) elaborar modelos de computador para predecir la respuesta de los acuíferos al desarrollo y utilización del agua subterránea. Con los resultados del estudio y los modelos de los acuíferos, los planificadores y los gerentes de los recursos hídricos disponen de la información necesaria para llevar a cabo la gestión del agua subterránea y pueden evaluar las alternativas en la administración y manejo del recurso hídrico en su conjunto.

Se consultó algunos trabajos realizados sobre el sistema acuífero de las Praderas Altas ("High Plains") donde la Formación Ogallala constituye uno de los acuíferos más extensos y más explotados en el mundo. Esto, sin embargo, no ha ocasionado efectos ambientales especialmente desfavorables. La explotación de los acuíferos de las Praderas Altas se ha programado cuidadosamente y demuestra las consecuencias que pueden ocurrir con un desarrollo intenso y sostenible. En los trabajos respectivos se dan detalles del estudio hidrogeológico y su modelación.

Estados Unidos utiliza anualmente  $101 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup> de agua, de los cuales 18% se usa en la industria y 33% en irrigación (LLAMAS *et al.* 1992).

En GUTENTAG *et al.* (1984), se anota que el primer estudio regional de las Praderas Altas lo realizó W.D. Johnson del USGS en 1901. En las conclusiones destaca que hay enormes recursos de agua subterránea, pero que hay pocas posibilidades para el desarrollo de la agricultura porque la región tiene limitada precipitación, alta evaporación y pocos arroyos. Desde ese tiempo, los avances tecnológicos han proporcionado los medios para explotar y utilizar el agua subterránea identificada por Johnson. Las Praderas Altas es una de las regiones con mayor desarrollo agrícola en los Estados Unidos, en donde el 90% del agua utilizada para irrigación es subterránea, y donde la explotación del agua subterránea es igual al 30% del total de agua subterránea utilizada en toda la Unión. En un área de 450.500 km<sup>2</sup> en 8 estados, por medio de 170.000 pozos se regaron 52.650 km<sup>2</sup> en 1978 con un bombeo de  $2,8 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup> de agua subterránea. Los acuíferos de las Praderas Altas

consisten principalmente de unidades geológicas del Terciario y Cuaternario, conectadas hidráulicamente. Las rocas del Terciario Superior incluyen parte de la Formación Brule, el Grupo Arikaree y la Formación Ogallala. Los depósitos cuaternarios incluyen depósitos aluviales, dunas de arena y relleno de valles. La Formación Ogallala (Mioceno Superior) subyace 347.000 km<sup>2</sup> y es la unidad geológica que contiene los principales acuíferos. Consiste de una secuencia heterogénea de arcillas, limos, arenas y gravas depositadas por los arroyos que fluyeron desde las Montañas Rocosas hacia el Este. El flujo subterráneo tiene una velocidad aproximada de 0,30 m/día. Dentro de la Formación Ogallala hay zonas cementadas con carbonatos cálcicos, lo cual las hace resistentes a la erosión formando escarpes característicos en los bordes. Su espesor varía de 0,30 a 215 m. En las Praderas Altas, regionalmente, los acuíferos son libres, compuestos principalmente de arenas y gravas. Su máximo espesor saturado es de unos 300 m, con un promedio de 60 m. La conductividad hidráulica varía de menos de 8 a 90 m/día con un promedio de 18 m/día. El rendimiento específico varía de menos de 10 a 30 %, con un promedio de 15%. La precipitación media anual varía de menos de 400 mm en el W hasta 700 mm en el E. Las ratas de recarga provenientes de la lluvia, la principal fuente de recarga, fluctúan entre 0,6 mm/año en Texas a 152 mm/año en el SE de Kansas. El bombeo anual, en muchas partes, es unas 2 a 100 veces mayor que la cantidad de agua recargada por la lluvia, lo que ha ocasionado un descenso en los niveles freáticos, lo cual a su vez, ha ocasionado aumentos en las profundidades de bombeo, disminución en los caudales de los pozos y ha limitado el desarrollo del recurso agua subterránea al incrementar notablemente el costo de la energía necesaria para su extracción.

LUCKEY *et al.* (1986) explica que el sistema de flujo en los acuíferos se simuló utilizando un sistema digital, de diferencias finitas. Con un programa de computador se resolvió la ecuación de flujo del agua subterránea. Los datos de entrada al modelo fueron: 1) geometría del sistema acuífero; 2) límites del sistema; 3) constantes hidráulicas de los acuíferos; y 4) recarga y descarga. Adicionalmente, para los modelos del período de desarrollo, se necesitó la configuración inicial del nivel freático. Para la simulación, las Praderas Altas se dividieron en 3 partes: 1) La parte sur con 75.081 km<sup>2</sup> en Texas y Nuevo México, 2) la central con 125.567 km<sup>2</sup> en Texas, Nuevo México, Oklahoma, Colorado, y Kansas, y 3) la parte norte con 249.839 km<sup>2</sup> en Colorado, Kansas, Nebraska, Wyoming y Dakota del Sur para un total de 450.487 km<sup>2</sup>. La historia del uso del agua subterránea se dividió en 2 períodos: 1) El período previo al desarrollo en gran escala para irrigación, y 2) el período de desarrollo, iniciado en los años ochenta. Se construyeron y calibraron modelos separados para cada período.

En LUCKEY *et al.* (1988) se explica que los modelos calibrados, para reproducir adecuadamente las condiciones hidrogeológicas históricas, se utilizaron para proyectar los efectos del bombeo futuro estimado, con base en tres estrategias: 1) Continuación de la explotación, con las políticas económicas y gubernamentales correspondientes al año 1980, 2) adopción voluntaria de nuevas técnicas para reducir el uso del agua, y 3) disminución obligatoria, por mandato legal, del uso del agua. Para cada una de las 3 estrategias se pronosticaron, cada 5 años, desde 1980 hasta el año 2020, los siguientes parámetros: 1) El volumen de agua bombeada, 2) el descenso en los niveles, 3) la disminución en el espesor saturado de los acuíferos, 4) las reservas remanentes en el almacenamiento, 5) la disminución de los caudales de los pozos, y 6) la disminución en el flujo base de las corrientes. Los resultados más favorables son, en general, los obtenidos con la simulación de la estrategia 3, resumidos en WEEKS *et al.* (1988), quien también resume otros datos, hasta 1980, como sigue: 1) Los descensos de los niveles han variado entre 16 y 61 m; el último ocurrió en el condado Floyd, Texas. 2) Los niveles han disminuido en 29% del área total y han aumentado únicamente en 1% del área total. 3) De las reservas se han extraído  $2 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup> hasta 1980. 4) Los espesores saturados han disminuido más del 25%, en más de una cuarta parte en Nuevo México y Texas en 1980, y más del 25% en partes de Oklahoma y Kansas en 1950. En grandes áreas de 7 condados al sur del río Canadá, han disminuido más del 50%. 5) Las disminuciones en los espesores saturados conllevan una disminución en los caudales de los pozos, y por lo tanto, en las áreas regadas, las cuales han disminuido de 0,48 km<sup>2</sup>/pozo en 1958 a 0,25 km<sup>2</sup>/pozo en 1980. Desde 1958 a 1980, el número de kilómetros cuadrados irrigados en los 7 condados anteriores disminuyó un 131%, de 10.125 a 7.700 y el número de pozos aumentó un 143%, de 21.000 a 30.000. Los descensos en los caudales implican un aumento indudable en los costos de irrigación para las fincas.

Las normas legales que reglamentan el uso del agua subterránea, frecuentemente son diferentes en cada estado de la Unión, y pueden serlo dentro del mismo estado.

La calidad química del agua subterránea, en las Praderas Altas, llena los requerimientos para irrigación, casi en todas partes. Sin embargo, no llena los requisitos para el agua potable, en muchas partes.

La producción anual de alimentos, en las Praderas Altas, sin incluir el precio del agua para el abastecimiento humano y para abreviar el ganado, es de  $20 \times 10^{12}$  dólares (ZWINGLE 1993, p. 83).

Se dan a continuación dos ejemplos, tomados de MARGAT (1991), sobre las consecuencias perjudiciales de la explotación excesiva o intensiva, programada, de agua subterránea en las Praderas Altas.

El primero ilustra los incrementos en los costos de explotación causados por los descensos de los niveles de explotación. Los descensos también disminuyen los caudales unitarios, incluyendo a veces la disminución de la conductividad hidráulica del acuífero.

MARGAT (1991 p. 28) cita un ejemplo tomado de SCHEFTER (1984) sobre la explotación intensiva del acuífero Ogallala en el condado Floyd, Texas, donde más del 40% del volumen total bombeado entre 1940 y 1980 ha sido extraído de las reservas. La extracción aumentó de  $233 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año en 1958 a  $392 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año en 1979, y causó un descenso de los niveles freáticos de 50 a 60 m, lo cual equivale a una reducción del espesor saturado del acuífero del 66%, ocasionando que los costos de producción, por el valor de la energía y por el nivel de bombeo más profundo, pasaran de 0,31 dólares/m<sup>3</sup> a 2,15 dólares/m<sup>3</sup> entre 1952 y 1981, es decir, un aumento del 694%; este aumento fue de 172% entre 1952 y 1981, en valores del año de publicación (1991).

El segundo ejemplo ilustra cómo la explotación intensiva, programada, de los acuíferos, puede causar descensos prematuros de producción y sobrecostos de explotación inaceptables, que obligan a buscar otras fuentes de abastecimiento, también onerosas e imprevistas. El ejemplo es para el condado de Floyd, Texas, citado previamente.

MARGAT (1991, p. 29) cita las medidas, en estudio, para frenar el descenso de la producción agrícola, debido a la disminución de agua bombeada y al mayor costo que eso implica. Dice (según GOLUBEV & BISWAS 1985): Se ha estudiado la realización de derivaciones de por lo menos  $5 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/año a  $13 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/año de agua superficial del sistema Missouri-Mississippi, lo que implicaría el transporte a través de 542 a 1836 km, con diferencias de altura de 1000 m y costos de energía entre 6,6 y 49 millones de KWH/año. Las inversiones requeridas serían de 3,6 miles de millones (para proporcionar  $2 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/año) a 20 miles de millones de dólares de 1977 (para suministrar  $10,7 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/año), lo cual además de los costos de operación y distribución, haría aumentar el costo del suministro de agua de un 6% a un 20%, por encima del precio de producción del agua subterránea.

Otro ejemplo sobre las Praderas Altas se ha tomado de JOHNSON (1991), quien se refiere a los 135.000 km<sup>2</sup> de las

mismas en Texas, Oklahoma y Nuevo México, donde se han explotado intensamente los acuíferos de la Formación Ogallala, de manera programada, y donde los descensos de los niveles freáticos y la disminución en el abastecimiento son causa de gran preocupación sobre el futuro desarrollo del agua subterránea para irrigación; sin embargo, en este caso, la explotación no ha causado efectos negativos, que hayan deteriorado el medio ambiente. Su utilización se intensificó después de la sequía de los 1930 y de otra sequía entre 1952-1956. En los 1960 se incrementó ligeramente y permaneció constante durante los 1970. En 1980 se extrajeron 7,7 billones de m<sup>3</sup> de agua subterránea para irrigar 18.583 km<sup>2</sup> en los tres estados. Como consecuencia, los niveles descendieron considerablemente en toda el área. Los descensos fueron de 3-15 m en un 46% de la región, 15-30 m. en un 12% y más de 30 m en un 5%. En un 35% de la región los niveles permanecieron constantes y fluctuaron un máximo de 3 m hacia arriba o hacia abajo. Hasta 1980 se había extraído el 19% del agua almacenada en el acuífero. En 1980, los niveles freáticos llegaron a estar entre 30 y 120 m en gran parte del área. Esta situación causó gran preocupación general, porque el acuífero podría agotarse en algunas décadas. Para predecir las consecuencias del bombeo de 1980 al 2020, se utilizaron los modelos de computador explicados previamente, para las tres estrategias consideradas (LUCKEY *et al.* 1988.). Aunque no hay grandes diferencias en los resultados previstos, se espera que habrá una reducción en el espesor saturado y un descenso en los niveles freáticos de más de 30 m en grandes áreas.

Otros resultados para el periodo 1980-1989 son los siguientes: 1) Los descensos grandes y el uso intenso ocurrido antes de 1980, no continuaron durante los 80, y 2) En 45% del área de estudio los niveles descendieron, pero no tan rápidamente como se predijo, mientras que en el restante 55% de la región, los niveles ascendieron entre 1981-1987, para luego descender ligeramente. Las causas principales para este comportamiento diferente al pronosticado, incluyen una precipitación mayor que la normal, instrumentación de factores económicos y de conservación que redujeron la demanda de agua para irrigación con la consecuente recuperación de los conos de depresión locales. Otro importante factor en la disminución del bombeo durante los 80 fue una reducción en el área regada, porque se aplicaron dos programas del gobierno que ofrecían incentivos para disminuir el área de irrigación. También existieron problemas financieros que desestimularon la agricultura, como fueron una baja en los precios de las cosechas y un aumento en los costos de los equipos, repuestos y préstamos. También se aplicaron métodos de riego más eficientes. A su vez, en 1988 y 1989, hubo una reanudación en los descensos de los niveles

freáticos, considerados a largo plazo, porque el agua subterránea aún se está extrayendo a una tasa mayor que la tasa de recarga. Sin embargo, la reducción en el área irrigada y las medidas previstas para conservar el agua, deben ayudar a reducir, a largo plazo, las tasas de bombeo y los descensos en los niveles freáticos.

Un ejemplo de explotación intensa de acuíferos, programada, que produjo consecuencias ambientales negativas, se tomó de LLAMAS *et al.* (1992) quienes resumen lo sucedido en el Valle de San Joaquín, parte occidental central, California. El sistema acuífero fue deliberadamente explotado en exceso, como parte del programa Plan de Agua para California ("California Water Plan"), para proporcionar impuestos que permitieran la importación de agua superficial.

Después de la Segunda Guerra Mundial, los precios de los artículos de consumo incrementaron el crecimiento de la agricultura y por los años 50 se bombeaban más de 1,2 billones de m<sup>3</sup>/año. El incremento en el área irrigada y el bombeo alteraron el sistema de flujo. La percolación del agua irrigada, no aprovechada por las mieses, excedió la infiltración natural y llegó a ser el mecanismo primario de recarga. A su vez, el mecanismo primario de descarga fue por medio de pozos y por la evapotranspiración de las mieses, en lugar de ser, por medio de la evapotranspiración natural, como ocurría durante los años de predesarrollo. La percolación durante el posdesarrollo llegó a ser unas 40 veces mayor que la recarga natural.

El bombeo afectó la carga hidráulica y la dirección de flujo en el sistema. Los cambios más pronunciados ocurrieron en un acuífero confinado de la parte central del valle occidental. Durante 1952, la superficie potenciométrica del acuífero confinado descendió entre 30 y 60 m con relación al periodo de predesarrollo. El marcado abatimiento causó que el agua en la parte inferior del acuífero fluyera desde el oeste, mientras que con condiciones naturales el flujo era desde el este. El fuerte abatimiento también creó una importante componente vertical de flujo desde el acuífero semiconfinado superior hacia abajo.

El bombeo en exceso de la recarga continuó por más de una década después de 1952 y causó un descenso adicional de la superficie potenciométrica. En 1967 esta superficie potenciométrica había bajado decenas de metros sobre la mayor parte occidental del valle. Las enormes cantidades de agua bombeada causaron un aumento en la pendiente de los gradientes hidráulicos, un aumento sustancial en las profundidades del bombeo y subsidencia del terreno. Los niveles dinámicos excedieron los 250 m en algunas partes y en 1972 la subsidencia fue superior a 3 m en la mayor

parte del área y llegó a ser de 9 m en algunos sitios. JOHNSON (1997) anota que el bombeo intenso causó un descenso de los niveles potenciométricos de más de 120 m en varias zonas del valle occidental, y que estos descensos causaron la compactación inelástica de los sedimentos de grano fino y la mayor subsidencia conocida en el mundo. Unos 13.000 km<sup>2</sup> se han hundido más de 0,30 m. Los costos asociados con la subsidencia del terreno, los aumentos en los niveles dinámicos, el deterioro en la calidad del agua de riego, fueron los factores determinantes que proporcionaron la justificación económica para importar agua por el Acueducto de California. Conviene especificar que el agua de irrigación se salinizó y contaminó con selenio, como consecuencia de la irrigación misma y no tuvo que ver con el descenso de los niveles de agua. En 1967 el agua superficial principió a sustituir al agua subterránea como la fuente primaria de irrigación. La gran disminución en el bombeo permitió una recuperación de la carga hidráulica en el sistema acuífero. En áreas de grandes abatimientos el agua subió 100 m y en promedio más de 30 m. En toda el área, la superficie potenciométrica ascendió, desde 1967 a 1984, más de la mitad del descenso ocurrido desde el predesarrollo hasta 1967.

En el área donde subyace el acuífero semiconfinado, el nivel freático subió, por lo menos, hasta 1,5 m debajo de la superficie y los problemas de drenaje resultantes se convirtieron en la nueva preocupación para los agricultores del área. Se instaló un techo colector, entre 1980-81, de unos 150 km<sup>2</sup>. El sistema fue efectivo para bajar el nivel freático, pero desvió el agua que pudiera recargar el sistema más profundo.

### Algeria y Túnez

Un caso histórico sobre los beneficios sociales y económicos que proporciona la minería del agua subterránea, o sea su explotación como recurso no renovable, lo trae LLAMAS *et al.* (1992) sobre la explotación de dos acuíferos en el norte del Desierto de Sahara, con lo cual se desarrolló la irrigación en vastas áreas sin agua y se facilitó la población de las mismas.

LEHR (1991) admite que la minería del agua subterránea es una forma aceptable de desarrollo si se hace con pleno conocimiento de las consecuencias que tal acción pueda traer a largo plazo.

La gran cuenca sedimentaria del norte del Sahara ocupa 700.000 km<sup>2</sup> en Algeria y 80.000 km<sup>2</sup> en Túnez. En el subsuelo hay dos sistemas de acuíferos. Son los acuíferos de las Formaciones Continental Intercalado ("Continental Intercalaire") (CI) y el Complejo Terminal ("Complexe

Terminal") (CT), de menor extensión. Están compuestos principalmente de areniscas, el primero, con composición más heterogénea el segundo, con areniscas y rocas carbonatadas. Estos sistemas son artesianos, con acuíferos libres en sus límites. Las cargas hidráulicas alcanzaban 300 m sobre el suelo en los acuíferos del CI, que eran mayores que las cargas hidráulicas del TI.

El desarrollo de estos acuíferos se inició para la irrigación de los oasis en la segunda mitad del siglo XIX. Las extracciones desde el CI no aumentaron especialmente en la primera mitad del siglo XX; aumentaron más las del CT, lo cual ocasionó una disminución en las descargas de los manantiales, especialmente en Túnez. Los volúmenes extraídos en los 80 fueron del orden de 0,5 billones de m<sup>3</sup>/año para el CT y unos 0,17 billones de m<sup>3</sup>/año para el CI. Probablemente se han extraído más de 4 billones de m<sup>3</sup> de agua de las reservas de los dos acuíferos hasta 1981. Este es un volumen pequeño comparado con la enorme capacidad de los reservorios, que es mayor a 10.000 billones de m<sup>3</sup>.

La UNESCO realizó un estudio en 1972 (en LLAMAS *et al.* 1992), con modelos hidrogeológicos de los sistemas acuíferos y formuló diferentes alternativas para el abastecimiento de la demanda. Para el CI, el acuífero más explotado, los niveles previstos descenderán, para el año 2000, unos 110 a 180 m. Para el CT unos 30 a 45 m. El descenso de los niveles ocasionará casi la completa desaparición de los manantiales y la reducción general de la presión artesisiana. Después de 1970, los efectos medidos fueron mucho menores que los proyectados.

En 1983 otro estudio actualizó los resultados hasta 1992 y proyectó los objetivos de acuerdo a los requerimientos de agua y a las alternativas de explotación hasta 2010 y 2040. La calibración de los modelos hidrodinámicos se basó en los cambios observados en los caudales y en los niveles entre 1970 y 1981. La extracción del agua subterránea para el año 2010 variará de 1,7 a 2,7 billones de m<sup>3</sup>/año y para el año 2040 de 1,7 a 5,5 billones de m<sup>3</sup>/año.

Las estrategias de desarrollo se basaron en la minería del agua subterránea. Por lo tanto las autoridades deben fijar el límite hasta el cual la producción de agua es viable en relación con los costos. El volumen acumulado de agua minada entre 1980 y el 2040 se estima ser del orden de 35 a 135x10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> en el CI y de 30 a 100x10<sup>9</sup> en el CT. De acuerdo con lo proyectado a partir del año 2000, más de la mitad de las reservas se extraerán y proporcionarán el 90% o más del agua total almacenada.

MARGAT (1991, p 29) hace notar que la explotación del

acuífero confinado CT, ha provocado el agotamiento parcial de algunas surgencias artesianas del orden de 5 m<sup>3</sup>/s (originalmente), donde el caudal ha disminuido en más de 100 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año y tiende a cero, perjudicando notoriamente a los usuarios de esas aguas superficiales o más simplemente, poniendo en peligro los ecosistemas acuáticos dependientes, al disminuir los caudales de estiaje.

## Israel

En Israel el 67% del total de agua utilizada, es subterránea (LLAMAS *et al.* 1992). Se resume a continuación una publicación de SCHWARZ (1992) sobre la gestión del recurso hídrico, haciendo énfasis en el agua subterránea.

En Israel se elaboró, entre 1986 y 1988, un nuevo plan maestro para la gestión del recurso hídrico, con el objeto de resolver la crisis resultante del anterior manejo del agua.

En el pasado, el objetivo de la gestión del recurso hídrico fue aumentar la cantidad de agua disponible y disminuir las pérdidas e inundaciones. Ahora es evidente que con esos objetivos los recursos hídricos están en peligro de deteriorarse por las siguientes razones: 1) Intrusión de agua marina desde el Mediterráneo; 2) Intrusión de salmueras profundas; 3) Lixiviación de sales, nutrientes y herbicidas del agua de irrigación; y 4) Lixiviación de contaminantes superficiales.

En el futuro, la explotación del agua subterránea disminuirá significativamente, para terminar con la explotación intensiva de los acuíferos y para permitir que los niveles potenciométricos asciendan hasta llegar a un estado de explotación seguro. Igualmente se mejorará la calidad del agua y el abastecimiento, aún a expensas de disminuir la cantidad y aumentar los costos de producción. El programa propuesto de gestión cumplirá estos objetivos manteniendo los niveles de agua más altos que al presente, con lo cual se aumentará la presión hidrostática para prevenir la intrusión marina y se almacenarán suficientes reservas para utilizarlas en los períodos de sequía.

Las diferentes calidades de agua se dividieron en 3 grupos: 1) Dulce, para todos los usos, incluyendo el agua potable con un contenido de cloruros menor a 400 mg/l; 2) salada, para uso industrial, desalinización e irrigación de cultivos tolerantes; y 3) aguas servidas tratadas y de reservorios superficiales para irrigación.

El volumen total explotado de agua subterránea (dulce y salada) que en 1984-85, fue de 1340x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, será de 1115 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> en el 2000. El agua dulce explotada que en 1984-85 fue de 1205x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año, será de 955x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año en el

2000; que en porcentaje del agua total utilizada, pasará de 64% a 26%. El abastecimiento total de agua, para todos los fines, que en 1984-85 era de 2050x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> será de 2090x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> en el 2000. El año 1984-85 se tomó como referencia, porque representó el clima promedio durante los últimos 5 años.

El acuífero costero tiene actualmente niveles bajos, explotación muy intensiva, intrusión marina y otros contaminantes. El déficit hidrogeológico se estima en 1100 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, el cual se propone restituir en el año 2000. El programa de restauración de este acuífero incluye una disminución gradual en la producción actual de 400x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año a 210x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año. La mayor parte de la reducción se logrará con una disminución en el bombeo y con aumento en la recarga artificial.

El acuífero Yarkon-Taninim soporta abatimientos grandes, está en peligro de aumentar su salinidad y de ser contaminado. Se evitará su salinización, permitiendo que un flujo de 40-50x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> de la corriente Tanini, actúe como barrera a la intrusión marina y se establezca un equilibrio hidráulico entre la sección del acuífero con agua de buena calidad y aquella con agua salada. Su producción será de 310x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año. Este acuífero será la fuente principal de agua potable para las poblaciones por medio de un sistema separado de distribución. Servirá como reservorio regulador de la Empresa Nacional de Agua ("National Water Carrier") (NWC). Este acuífero se recargará artificialmente con 35x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/mes, de agua del lago Tiberiades, en el invierno.

Otros acuíferos producen 510x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año, y en el futuro producirán 560x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año. Pero los acuíferos con explotación intensiva y con aumentos en su salinidad tendrán un bombeo menor que el actual. Sin embargo, en otros acuíferos no plenamente utilizados, debido al costo excesivo, se aumentará el bombeo en el futuro.

Para reducir el riesgo de no tener agua para los usuarios, en años secos, la restauración de los niveles en los acuíferos se acelerará por medio de una reducción permanente en la producción y por medio de un aumento en la recarga artificial. En el próximo futuro el programa de restauración regresará a los acuíferos unos 70x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año. En el mediano y largo plazo la cantidad explotada de los acuíferos será de 35x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año, menos que el promedio posible para los niveles mínimos y se garantizará un almacenamiento de 700x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

El lago Tiberiades permanecerá como la fuente principal del NWC. La calidad de su agua se garantizará como fuente de agua potable, previniendo la contaminación de la cuenca y controlando el exceso de salinización.



La agricultura, en el año 1984-85, consumió en total  $1410 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, disminuyó a  $1150 \times 10^6$  m<sup>3</sup> en el 1987-88, porque existieron condiciones relativamente húmedas de invierno y hubo una crisis en el mercado del algodón. Para el año 2000 la cantidad máxima disponible de agua para la agricultura será de  $1180 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, lo que requiere una inversión de  $100 \times 10^6$  dólares anuales en el periodo 1988-2000. Pero con la reducción en la inversión anual de  $30 \times 10^6$  de dólares, se podrá utilizar únicamente  $1000 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de agua. Además no hay agua disponible en los acuíferos para fines agrícolas, ni las condiciones tecnológicas pueden implementarse, desde el punto de vista económico, para desalinizar o importar agua. Por consiguiente la agricultura está en peligro de disminuir en Israel.

Sobre el costo del agua se tiene lo siguiente. Un 40-45% del agua fue vendida a precios más bajos que la producción. El máximo precio, en dólares, para la agricultura y la industria es de 0,12/m<sup>3</sup>; para el uso doméstico cuesta 0,20/m<sup>3</sup>. El precio máximo es fijado por decisiones administrativas. La diferencia entre costos y precio de venta lo cubren con subsidios gubernamentales, los cuales son del orden de 700 a  $800 \times 10^6$  dólares por año. El subsidio para uso doméstico alcanza unos  $110 \times 10^6$  dólares por año. Reiterativamente, en la última década se ha argumentado que cobrar un precio real disminuirá la demanda y reducirá la explotación intensiva. Para tal fin se propondrá implementar un programa que incluye cobrar impuestos para la explotación de los acuíferos, pagados por todos los usuarios, con lo cual se espera una disminución en el uso del agua subterránea y se propicia la sustitución de la misma con agua importada o agua servida tratada. Teniendo en cuenta las limitaciones hidrológicas, se propone, en el plan maestro, un costo máximo de 0,35 dólares/m<sup>3</sup>

## Libia

Libia utiliza 100% de agua subterránea para todos sus usos (LLAMAS *et al.* 1992). El siguiente caso histórico ilustra el deterioro en la calidad del agua para el abastecimiento de la ciudad de Trípoli (EL-BARUNI 1997). Es un ejemplo de la explotación de las reservas no renovables planificada y con conocimiento de las consecuencias, que muchos autores justifican plenamente, como FOSTER (1991) quien afirma que no toda sobreexplotación (*sic*) es un hecho dramático o negativo que debe considerarse como uso irracional del agua subterránea. Si se planifica con objetivos específicos y las consecuencias negativas han sido técnicamente evaluadas y son económicamente aceptables, tal sobreexplotación puede representar una política lógica de explotación. Puede ser el caso donde la minería del agua subterránea permite el desarrollo de un ciclo económico, el cual dará camino para usar un agua más cara al final del

período o usar nuevas tecnologías que mejoren el uso eficiente del agua.

Trípoli, la capital de Libia, a orillas del Mediterráneo, tiene una población de 1,4 millones, con un requerimiento total de agua de  $120,5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año. Esta cantidad es proporcionada por el bombeo de los pozos del campo Suani, localizado a 6 km al sur de la ciudad. Los pozos tienen caudales entre 7 y 36 LPS y capacidades específicas entre 3,5 y 2,4 LPS/m. Sus profundidades están entre 85 y 147 m.; aprovechan un acuífero libre con espesores saturados entre 100 y 140 m. Sus transmisividades varían entre 173 y 360 m<sup>2</sup>/día, y el rendimiento específico entre 4 y 10%. La profundidad del nivel freático varía entre 30 y 50 m.

La descarga es mayor que la recarga, y por lo tanto se ha causado un descenso del nivel freático, entre 0,3 a 0,6 m/año, que dió como resultado una intrusión marina, con un aumento de los STD de 265 y 674 mg/l en 1976 a más de 10.700 mg/l en 1993. Los cloruros pasaron de 74 a 3.400 mg/l del 76 al 93. El deterioro sufrido por el agua subterránea ha obligado a recomendar reducir su explotación. El déficit de agua se solucionará por medio de una planta de desalinización o por el transporte de agua dulce de otros acuíferos localizados al sur de Trípoli.

El gobierno libio ya había iniciado la construcción del acueducto, de 1900 km, posiblemente el más largo del mundo, para transportar  $2 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/día desde los campos de pozos de Tazerbo y Sarir en el Sahara, hasta el Golfo de Sirte con una inversión mayor a los  $3.300 \times 10^6$  dólares de 1983. Trípoli se abastecerá de otro campo de pozos del Sahara, localizado en Fezzán a una distancia un poco menor o similar. El agua subterránea, descubierta en el Sahara en 1966, es suficiente para abastecer a toda la República Socialista Popular Arabe Libia, por lo menos durante 50 años (ANÓNIMO 1988).

## Londres

El caso de la ciudad de Londres ilustra el manejo conjunto del recurso hídrico para el abastecimiento de la ciudad, los métodos de recarga artificial previstos y el uso y desuso de los acuíferos y las consecuencias del incremento en los niveles estáticos (KOZLOVSKY 1988).

La Cuenca de Londres es un sinclinal asimétrico de estratos terciarios y cretácicos. Las formaciones terciarias principales son la Arcilla de Londres ("London Clay"), los estratos de arcillas Woolwich y Reading ("Woolwich & Reading Clays"), y las arenas Thanet ("Thanet Sands"). La principal formación cretácica es la Marga ("Chalk"), la cual

es una caliza de grano fino, fisurada.

El principal acuífero no confinado es la Marga, la cual forma los cerros ondulantes al norte y sur de la ciudad, los cuales constituyen la zona de recarga natural hacia la región confinada, de la parte central de la cuenca, donde la Marga y Arena Basal ("Basal Sand") están confinadas por la Arcilla de Londres y las arcillas Woolwich y Reading. Bajo condiciones naturales el flujo subterráneo se produce desde los acuíferos libres hacia la región confinada. La zona de recarga tiene 4.500 km<sup>2</sup>. La recarga natural sobre la región no confinada es de  $1,2 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/día y el flujo base estimado es de  $1 \times 10^6$  dejando una diferencia de  $2 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/día como flujo dentro de la región confinada.

La transmisividad varía desde 30 m<sup>2</sup>/día en las partes más profundas del acuífero confinado a 2000 m<sup>2</sup>/día en la Marga no confinada. Los rendimientos específicos de la Marga no confinada son de un 2% y el coeficiente de almacenamiento del acuífero confinado es del orden de  $1 \times 10^{-4}$ .

Las primeras explotaciones del agua subterránea principiaron en el año 1820. Los bombeos del acuífero confinado alcanzaron un máximo de 220.000 m<sup>3</sup>/día en 1940. Luego descendieron para caer a 90.000 m<sup>3</sup>/día en 1985. Los bombeos del acuífero libre aumentaron también hasta 1940, pero en contraste con los del acuífero confinado, continuaron creciendo hasta 1970, cuando la extracción total de la cuenca de Londres fue de  $1,28 \times 10^6$ , unos 80.000 m<sup>3</sup>/día más que la recarga natural.

Después de 1970 ha habido una disminución en la extracción desde el acuífero libre, porque hubo un descenso en el uso industrial. En 1985 la extracción desde la zona no confinada representaba un 90% del total extraído de  $1,15 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/día.

La recarga artificial se llevó a cabo de manera experimental entre 1953 y 1970 y entre 1977 y 1984, en la región confinada del Valle-Lee Inferior ("Lower Lee Valley"). Los experimentos fueron satisfactorios al producir un ascenso en los niveles potenciométricos. La cantidad total recargada, entre 1953 y 1970, fue relativamente reducida, equivalente al flujo de 5.000 m<sup>3</sup>/día durante 18 años.

Las extracciones han producido diferentes efectos en la región no confinada, comparada con la región confinada.

Los abatimientos en la región no confinada no han sido excesivos, excepto en áreas con gran concentración de población e industrias, como son Colne y Darent. En estas áreas los niveles freáticos, en general, están debajo del

cauce de las corrientes y por lo tanto han reducido el flujo base a cero, y a menudo han producido un goteo reverso dentro de la Marga.

La región confinada ha sufrido abatimientos masivos, que han desaguado grandes áreas de la Marga y Arena Basal. Las condiciones más críticas se alcanzaron en la mitad de los 60 cuando el nivel potenciométrico se situó entre 5 y 25 m debajo del techo de la Marga, equivalente a un abatimiento regional entre 70 y 80 m lo cual ocasionó el hundimiento de varios cientos de milímetros del Centro de Londres (LERNER & BARRETT 1996).

Durante 1970 los niveles potenciométricos en la Marga en toda la región confinada han ascendido y lo han hecho a ratas entre 0,3 y 2 m/año, con las cuales se necesitarían entre 10 y 80 años antes que la Arena Basal volviera a estar saturada. La razón para este ascenso es la reducción en la explotación del agua subterránea, la cual ha sucedido en la región confinada desde 1940 y en la no confinada desde 1971-72.

El volumen total para el abastecimiento de la Cuenca de Londres se estima en  $2,7 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/día, de los cuales 60% es tomada de los ríos Támesis y Lee. El resto proviene del agua subterránea de la región no confinada (91%) y confinada (9%). El abastecimiento de agua para Londres (5,5 millones de habitantes) está en déficit. La demanda crece a una rata constante de 1% por año, y la disponibilidad no es suficiente para mantener un servicio normal durante los años de sequía, que ocurren en el SE de Inglaterra cada 8 años.

Para el periodo 1986 a 2011 se tratará de disminuir en el 10% las pérdidas negras y se tomarán otras medidas, que incluyen un manejo más eficiente del agua del río Támesis durante periodos de sequía hasta aumentar el abastecimiento en 170.000 m<sup>3</sup>/día.

Las actuales ratas de ascenso en los niveles no son suficientes para satisfacer las necesidades de agua. Entonces, si se requiere tener agua subterránea disponible para el abastecimiento durante las épocas de sequía, es indispensable realizar recarga artificial. La fuente para la recarga artificial es el agua derivada del río Támesis, previamente tratada antes de inyectarla, durante los periodos de avenidas. Durante los periodos de sequía los pozos de recarga se usarán para sacar agua, la cual se tratará y bombeará directamente a la red de distribución. Para llevar a cabo la recarga y clarificar algunas incertidumbres del proceso, se iniciaron 4 proyectos interrelacionados en 1985, que son: a) Cantidad de agua, para conocer mejor el volumen disponible; se requiere mejorar el conocimiento

regional del movimiento del agua subterránea, así como mejorar el conocimiento de los componentes del balance hídrico y la predicción de los ascensos regionales de los niveles potenciométricos. La modelación del agua subterránea constituye la base de este proyecto. b) Calidad del agua. Se requiere mejorar el conocimiento de la calidad del agua en el futuro, como consecuencia de los cambios ocasionados por las medidas de recuperación previstas y determinar si esos cambios tienen alguna implicación para el tratamiento del agua. Este proyecto incluye trabajo exhaustivo de campo y de laboratorio. c) Tratamiento del agua. Requiere investigación para bajar los costos y hacer más flexibles las alternativas para la desinfección por cloración convencional. d) Consecuencias del ascenso de los niveles de agua.

Los posibles problemas relacionados con el ascenso de los niveles de agua subterránea, dentro de la Cuenca de Londres, los estudia el CIRIA ("Construction Industry Research and Information Association") (Asociación de la Investigación sobre Construcción, Información e Industria).

Los ascensos de los niveles pueden causar diferentes daños relacionados con: a) una reducción en la capacidad de soporte de los pilotes de las construcciones; b) un cambio en los esfuerzos pre-existentes entre los revestimientos de los túneles y el subsuelo cercano; c) un aumento en la carga sobre los muros de contención de las construcciones; d) el desarrollo de presiones ascendentes debajo de los cimientos y placas de los pisos, y e) el hinchamiento y levantamiento de las arcillas. También pueden introducir o aumentar el flujo de agua subterránea dando lugar a: a) goteras dentro de los sótanos, túneles y ductos subterráneos; b) solución de minerales y el aumento de la posibilidad de ataques químicos sobre las estructuras en el subsuelo; por ejemplo, la concentración de sulfatos, debido a la oxidación de la pirita podría ocasionar la corrosión y degradación de los pilotes de concreto y del revestimiento de los túneles; c) confinamiento de gases peligrosos; y d) aumento en el drenaje en los trabajos temporales y en las excavaciones.

En general, los posibles daños dependerán de la geología, del tipo de estructura en cuestión y de las fluctuaciones del nivel del agua subterránea, que se estudiarán con la modelación del régimen del agua subterránea.

## México

En varios acuíferos de México se hace una explotación intensiva de las aguas subterráneas como recurso no renovable. CANALES (1991) resume la sobreexplotación (*sic*) del agua subterránea en México como sigue.

El 70% del territorio nacional está constituido por zonas áridas y semiáridas, donde se usa casi exclusivamente agua subterránea, por lo cual la extracción total de agua subterránea es de unos  $28 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/año, de los cuales cerca del 70% se destina a irrigación de unas  $2 \times 10^6$  hectáreas, 20% para satisfacer la demanda de  $55 \times 10^6$  habitantes, 7% para la industria y el 3% para la población rural. En los últimos 40 años se ha alcanzado la sobreexplotación (*sic*) de una tercera parte de los acuíferos, esto es, alrededor de 80, de los que se extrae un volumen almacenado, no renovable, del orden de  $10 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/año, con abatimientos regionales de 1 a 3 m por año y niveles dinámicos de 70 a 130 m de profundidad.

CANALES (*op.cit.*) recomienda las siguientes políticas para la gestión de los acuíferos, algunas de las cuales ya han sido aplicadas en un 50% en los últimos 15 años: 1) Implantar técnicas para utilizar en conjunto las aguas superficiales y subterráneas y realizar recarga artificial. 2) Reforzar la obtención de información de la explotación de los acuíferos y su interacción con el agua superficial. 3) Mejorar la coordinación de todas las dependencias que manejan información hidrológica y hacer disponible tal información a través del Banco Nacional de Información Geohidrológica. 4) Optar por la explotación de las reservas no renovables únicamente después de haber efectuado los estudios que indiquen la conveniencia de realizarlo. 5) Apoyar el uso eficiente del agua y la reducción de la explotación excesiva mediante el establecimiento de tarifas que eliminen los subsidios y que se ajusten a la capacidad económica de los usuarios. 6) Promover la mayor participación y cooperación de los usuarios en la elección e implantación de programas para el aprovechamiento del agua subterránea. 7) Compensar los daños causados a los usuarios por usar aguas subterráneas o superficiales (de mala calidad). 8) Evitar la sobreexplotación de acuíferos a largo plazo con fines agrícolas, con excepción de las zonas cuidadosamente estudiadas y sin otra alternativa. 9) Restringir la descarga de desechos de tal forma que se garantice la calidad del agua subterránea.

## SABANA DE BOGOTÁ

Las entidades del gobierno de Colombia encargadas de estudiar y administrar los recursos hídricos subterráneos son, según la Ley 99 del 93: la Car en la Sabana de Bogotá y el Dama ("Departamento Administrativo del Medio Ambiente") en el Distrito Capital. Las dos entidades, infortunadamente, no han acometido todavía muchas de las responsabilidades que les dan las normas legales desde hace varios años. Por consiguiente, hay un desconocimiento inaceptable de la hidrogeología de esta zona del país.

El último programa conocido para estudiar la hidrogeología de la Sabana fue realizado por Ingeominas para la Car, entre 1989 y 1993. El objetivo principal fue organizar una oficina de aguas subterráneas y entrenar un grupo de profesionales de la Car, quienes junto con los de Ingeominas ejecutarían el estudio hidrogeológico cuantitativo de la Sabana. No se pudo formar el grupo de profesionales de la Car, ni obtener la participación activa y eficiente de la Corporación y en consecuencia el estudio realizado adolece de varias omisiones y errores. La no participación de la Car también ocasionó la desactualización inmediata del estudio, el cual debe reposar en esa Corporación, junto con tres estudios hidrogeológicos parciales, terminados en los años 1969, 1975 y 1982. En la Car también deben reposar tres inventarios parciales de pozos terminados en 1962, 1986 y 1987 (ALVAREZ 1993). Por otra parte, el Dama realizó el año pasado un inventario de pozos en el Distrito Capital, ya desactualizado.

El estudio hidrogeológico de Ingeominas es el único que cubre todos los 4.305 km<sup>2</sup> de la Sabana. Está consignado en más de 10 informes inéditos, copias de los cuales deben estar disponibles en las bibliotecas de la Car y de Ingeominas. Cada informe con sus anexos también se grabó en los respectivos medios magnéticos.

## RECURSOS Y RESERVAS DE AGUA SUBTERRANEA

Adicionalmente a los cálculos de recursos y reservas presentados más adelante, se han hecho otros estimativos parciales sobre las reservas de agua subterránea en la Sabana de Bogotá, que se resumen a continuación.

NIÑO *et al.* (1978) calcularon un volumen almacenado de 18.398x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> para el Grupo Guadalupe, en un área de 1.278 km<sup>2</sup> con espesores de 70 m para la Fm. Arenisca Tierna y 90 m para la Fm. Arenisca de Labor; asumieron una porosidad total del 9%. No consideraron la Fm. Arenisca Dura.

MOLANO & MOSQUERA (1984) estimaron un volumen de 1.500x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> para el Grupo Guadalupe, hasta una profundidad de 300 m, con un  $S = 1 \times 10^{-4}$  y 12.900x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> para profundidades entre 300 y 600 m, con un  $S = 1 \times 10^{-2}$ . El volumen total calculado fue de 14.400x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

CARREÑO (1992) calculó para el Grupo Guadalupe un volumen almacenado de agua subterránea de 60.000x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, y de 9.000x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> en el Cuaternario de la Sabana, para un total de 69.000x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Consideró un área de 6.000 km<sup>2</sup>. No especificó el sistema de cálculo.

Los estimativos anteriores no consideran la misma

área de la Sabana de Bogotá, ni todos los acuíferos existentes.

ROBLES & ALVAREZ (1993 y 1994) presentan el cálculo de los recursos y reservas de agua subterránea en la Sabana de Bogotá utilizando una metodología práctica, de tal forma que puedan recalcularse fácilmente, a medida que se obtenga más y mejor información.

Se llaman *recursos* (CUSTODIO & LLAMAS 1976, p. 2259-2260) a la diferencia entre la recarga anual a los acuíferos y la descarga anual de los mismos por medio de pozos, aljibes y manantiales. La recarga se calculó con el balance hídrico el cual, infortunadamente, no consideró los cambios en el almacenamiento subterráneo, lo cual deberá corregirse en el futuro. La descarga, con los aforos, entre 1989-90, de todos los puntos de agua: 3672 pozos, 909 aljibes y 487 manantiales. Estos recursos varían a lo largo del año y están relacionados con las reservas reguladoras.

Las reservas se dividieron en *reservas reguladoras* y *reservas seculares, multianuales o pasivas* (CUSTODIO & LLAMAS *op. cit.*).

Las reguladoras son aquellas que intervienen en el balance hídrico y las que se cuantifican mediante el análisis de las variaciones de los niveles potenciométricos. Se pueden extraer de los acuíferos confinados, sin drenar los acuíferos. Proviene de los cambios en el almacenamiento por el flujo desde otras cuencas, o por la recarga anual recibida, o por la decompresión y expansión producida al abatir, teóricamente, el nivel potenciométrico desde el nivel estático hasta el techo promedio del acuífero en las rocas consolidadas, o hasta el acuífero más superior en las no consolidadas. Se calculan con el coeficiente de almacenamiento.

Las seculares, multianuales o pasivas son aquellas que proporcionan los acuíferos confinados o semiconfinados cuando pasan a ser libres por descensos en la carga hidráulica del nivel potenciométrico y por lo tanto implican drenar los acuíferos. Se calculan con el rendimiento específico de los acuíferos.

Las reservas seculares en los acuíferos profundos, de unos 2.000 m, se reincorporan al ciclo hidrológico, en un promedio de 1.400 años, según la UNESCO (1978, p 109). Para fines prácticos éstas últimas podrían considerarse no renovables.

Para calcular las reservas en los 2000 km<sup>2</sup> planos, se procedió como se explica a continuación.

Se seleccionaron los cuatro acuíferos más importantes de la Sabana de Bogotá. Para cada uno de ellos, en cada región o cuenca se tomó un coeficiente de almacenamiento representativo. Se asignó para todos los acuíferos un rendimiento específico o porosidad eficaz del 5%, valor menor al utilizado por DAVIS (1969, en CUSTODIO & LLAMAS 1976), para cálculos similares. Para calcular las áreas de los acuíferos se utilizaron los cortes geoelectrónicos. A cada corte se dió un área de influencia en los mapas de isóbatas de la base del Cuaternario y del techo del Grupo Guadalupe. Si ésto no era posible, se utilizaron los cortes y mapas geológicos e hidrogeológicos, con similar procedimiento.

Los abatimientos disponibles se seleccionaron de la siguiente manera para calcular las reservas reguladoras: 1) Para los acuíferos del Grupo Guadalupe y de la Formación Arenisca del Cacho se utilizó como límite superior el nivel estático (potenciométrico) promedio y como límite inferior el techo promedio del acuífero. 2) Para los acuíferos de las formaciones no consolidadas (Tilatá, Sabana y Subachoque) se utilizó como límite superior el nivel estático y como límite inferior la profundidad a la cual está la capa acuífera más superficial.

Para seleccionar los espesores para calcular las reservas seculares, pasivas o multianuales, se procedió así: 1) Para los acuíferos del Grupo Guadalupe y de la Formación Arenisca del Cacho se utilizó como límite superior la parte inferior del techo promedio de los acuíferos y como límite inferior la base promedio de los acuíferos. Para seleccionar los espesores de los acuíferos en los pozos, se tomaron los diseños de los mismos y se midieron las rejillas utilizadas, generalmente escogiendo el mayor valor. Es común en la Sabana de Bogotá sobrediseñar los pozos; se colocan rejillas en cada horizonte permeable identificado en los registros geofísicos; por lo tanto se cree que los espesores calculados sean una estimación optimista.

Para seleccionar los niveles estáticos se tomó el promedio medido en los pozos cercanos al corte geoelectrónico o hidrogeológico correspondiente.

Para seleccionar la profundidad esperada al techo del acuífero se tomó un promedio de la estructura geológica considerada.

Las reservas reguladoras se obtienen así: *Área del acuífero x coeficiente de almacenamiento x abatimiento disponible.*

Las reservas seculares se obtienen así: *Área del acuífero x rendimiento específico x espesor considerado de los acuíferos.*

Es necesario anotar que las cifras obtenidas son aproximadas, puesto que el conocimiento del subsuelo en la Sabana de Bogotá es incompleto; con más y mejores datos se conocerá cada vez más exactamente.

A continuación se especifican los recursos y reservas, para los 4 acuíferos principales del Grupo Guadalupe y de las Formaciones Arenisca del Cacho, Tilatá, Sabana y Subachoque en la parte plana de la Sabana, para una profundidad promedio de 300 m y máxima de 400 m.

#### RECURSOS CALCULADOS

Área total de la Sabana	4.305 km <sup>2</sup>
Área total de recarga	2.040 km <sup>2</sup> (47% del total)
Recarga a todos los acuíferos	92,05x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /año
Descarga total	41,60x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /año
<i>Recursos totales (1990)</i>	<i>50,45 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año</i> <i>(1.600 LPS=320 pozos de 5 LPS)</i>

#### RESERVAS CALCULADAS

Área plana	2.000 km <sup>2</sup>
Profundidad (300 m promedio)	400 m. (máxima).
Reservas reguladoras	206,1x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> Gr. Guadalupe. 9,5x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> Fm. Ar. del Cacho. 106,4x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> Fm. Tilatá 124,3 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> Fms. Suba- choque y Sabana.
Total	446,3x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> (2.830 pozos de 5 LPS bombeando durante un año)
Reservas seculares	5.683,5x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> Gr. Guadalupe. 302,6x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> Fm. Ar. del Cacho. 1.072,5x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> Fm. Tilatá. 1.929,5 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> Fms. Suba- choque y Sabana.
Total	8.988,1x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> (20 veces las reservas reguladoras)
<i>Reservas Totales</i>	<i>9.434,4x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.</i>

Como el cálculo de los recursos totales se hizo con el balance y con el inventario de puntos de agua ya mencionados (terminados en el 90), si se considera que en la Sabana se perforan unos 90 pozos cada año, actualmente, después de 7 años se estaría tomando agua de las reservas reguladoras, porque los recursos equivalentes a lo que bombean 320 pozos de 5LPS, estarían totalmente aprovechados. Este planteamiento es válido si se tiene en

cuenta únicamente la recarga por lluvia, sin considerar la entrada de agua de cuencas vecinas, lo cual puede suceder en varias cuencas no cerradas de la Sabana.

Por otra parte, las reservas reguladoras son de  $446,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ , equivalentes a lo que bombearían el 77% del total de pozos existentes hasta el 90 o a 2.830 pozos de 5 LPS durante un año. El volumen de las reservas reguladoras, sería suficiente para suplir los  $20 \text{ m}^3/\text{seg}$ , que requiere Bogotá en el 98 (EAAB 1996), con el bombeo continuo de pozos durante 8,5 meses. Las reservas pasivas o seculares de  $8.988,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ , son del orden de 20 veces las reservas vivas. Las dos suman  $9.434,4 \times 10^6 \text{ m}^3$

Infortunadamente, a pesar de las cuantiosas reservas, en los programas de abastecimiento de la Ciudad hasta el año 2016 ( $35,7 \text{ m}^3/\text{seg}$ ), no se considera siquiera utilizar el agua subterránea para fin alguno, según el Plan Maestro de Abastecimiento de Agua de la EAAB (1996). El abastecimiento se programa únicamente con agua superficial, contrario a lo que se hace en Londres o Israel, por ejemplo. Por otra parte, las reservas subterráneas deben utilizarse para emergencias, con períodos prolongados e intensos de bombeo; para eso están disponibles. En el Planeta Tierra hay 33 veces más agua subterránea dulce que superficial.

Utilizar las reservas es plenamente compatible con realizar un desarrollo y gestión del agua subterránea en una cuenca con el concepto de desarrollo durable o sostenible. Los casos históricos ilustran el tema.

## DESARROLLO Y GESTION DEL AGUA SUBTERRANEA

En los informes del Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá (Ingeominas), está consignada la información más completa del área, existente hasta la fecha. Cubre los  $4.305 \text{ km}^2$ . Es una información desactualizada, con omisiones y errores. Sin embargo, podría ser la base técnica, que se podría completar y actualizar, teniendo en cuenta las observaciones y temas que se dan en los siguientes apartados.

Para actualizar la información y procesar la nueva, se recomienda utilizar algún sistema de información geográfica para generar mapas y gráficos digitales.

A las entidades responsables se les recomienda, especialmente, organizar una oficina de aguas subterráneas; debería ser un Departamento; y no contratar estudios parciales sino acometer con sus propios profesionales todas las actividades de la hidrogeología, porque se requiere formar hidrogeólogos con conocimientos y experiencia,

que actúen eficazmente, y lleguen a conocer detalladamente la cuenca. No es conveniente realizar periódicamente algún estudio relacionado con el tema. Se requiere una oficina que lleve a cabo sus tareas con continuidad. Los desactualizados estudios hidrogeológicos e inventarios enumerados previamente fueron contratados. Este hecho explica, en parte, la falta o carencia de departamentos de aguas subterráneas, y el no tener programas permanentes de estudio, ni profesionales especializados en el tema. Es posible también que esa carencia la explique la falta de voluntad política, que ha ocasionado un estado de perplejidad sobre lo que se debe hacer para conocer la hidrogeología de la Sabana y poder realizar una buena gestión del agua subterránea.

El agua subterránea es parte del ciclo hidrológico; es un recurso renovable; por lo tanto, tiene relación directa e importante con el agua superficial, por lo cual los dos recursos deberían estudiarse en conjunto, y su utilización debería hacerse bajo el concepto de desarrollo sostenible o durable, sinónimos que equivalen a practicar la explotación con el concepto que las necesidades del presente se deben satisfacer sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias. Los casos históricos de Londres, Israel, México, Estados Unidos, Algeria y Túnez, y Libia, ilustran el manejo durable del recurso. La reforestación, en general, favorece la conservación del recurso hídrico. Es otro tema que se debe estudiar e incrementar.

## EXPLORACION

La exploración tiene por objeto conocer la geometría, la litología y la hidrogeología de los sistemas acuíferos. La geología y prospección geofísica del estudio de Ingeominas, constituye una base muy aceptable, como elemento exploratorio. Los mapas superficiales tienen escala 1:25.000. Los del subsuelo, con igual escala, permiten obtener información hasta 500 m de profundidad. La hidrogeoquímica proporciona información sobre la calidad del agua de los acuíferos. También tiene mapas 1:25.000.

En el capítulo de hidrogeología se clasifican las formaciones geológicas como acuíferos, capas confinantes o semiconfinantes, y se calculan sus constantes hidráulicas. Los mapas hidrogeológicos tienen escala 1:25.000. No se tienen niveles potenciométricos, ni la delimitación de las áreas de recarga, para conocer mejor la dinámica del flujo, y los mecanismos de recarga y descarga. Estos datos faltantes se deben obtener.

La geología superficial, la prospección geofísica y la hidrogeología, por consiguiente, se pueden actualizar y

mejorar con las nuevas formaciones descritas por HELMENS & VAN DER HAMMEN (1995), y posiblemente con el enfoque sobre tectónica de REYES (1993). Los datos del subsuelo se complementarán integrando la información de los pozos perforados después de 1990, y de los futuros pozos que se deben supervisar directamente. Se sugiere rehacer los mapas y cortes hidrogeológicos con el método descrito por STRUCKERMEIER & MARGAT (1995).

No sería prudente ni práctico, en el momento, como programa específico, realizar más geología, más geofísica y más perforaciones exploratorias porque los gastos pueden ser excesivos e injustificados si se comparan con el valor del nuevo recurso identificado.

Par localizar y construir pozos en barrios de ciudades, fincas, industrias y similares, se requiere, por supuesto, hacer hidrogeología más detallada que la existente, pero ésto lo hacen los particulares interesados, quienes deben enviar los estudios a las entidades responsables.

## EVALUACION

Si se hace una revisión de la bibliografía hidrogeológica en los países desarrollados, se llega a la conclusión que los grandes aprovechamientos de agua subterránea no estuvieron precedidos por estudios de evaluación del recurso; la gran mayoría de las evaluaciones fueron realizadas después de tener un desarrollo considerable (BARBER 1992). Tal es el caso de los ejemplos previos en los Estados Unidos. Además, también según BARBER (*op. cit.*) es común que después de una evaluación detallada del recurso, costosa y demorada, los planificadores decidan que la disponibilidad de los fondos sólo permitirá aprovechar, en una primera etapa, una pequeña fracción del recurso probado, decisión que podría haberse tomado mucho antes. Además, a diferencia del agua superficial el desarrollo del agua subterránea se basa en la construcción de pozos, lo cual puede realizarse por etapas, y el comportamiento del acuífero puede ser monitoreado a medida que avanza su explotación. En la Sabana de Bogotá ha sucedido lo mismo que en otros países: se está utilizando el agua subterránea desde hace décadas sin tener su evaluación. BARBER (*op. cit.*) también comenta que los estudios detallados de evaluación son costosos y demorados, y es relativamente raro que sus resultados cuantitativos tengan un alto grado de exactitud.

Para realizar la evaluación del agua subterránea en la Sabana se requiere conocer el funcionamiento de los acuíferos, los recursos, y las reservas reguladoras y pasivas. La evaluación también se programará para determinar los beneficios y los efectos negativos resultantes de la extracción

de volúmenes conocidos de agua, en acuíferos también conocidos. A los efectos negativos se darán soluciones.

Para determinar los recursos (recarga menos descarga) se realizó un balance hídrico con datos históricos de 29 años, el cual se puede actualizar. El balance, del estudio de Ingeominas, no incluye los cambios en el almacenamiento subterráneo ni delimita las áreas de recarga de cada acuífero. Estas sí se midieron, sin embargo, y suman 2.040 km<sup>2</sup>. Las reservas se calcularon con un nivel potenciométrico promedio de los pozos. La descarga de los acuíferos se calculó con base en las descargas de cada uno, a través de los puntos de agua inventariados entre 1989 - 1990.

Para evaluar el recurso actualmente se requiere, entonces, completar los datos faltantes. Se reitera que es necesario delimitar y, por supuesto, preservar las áreas de recarga, las cuales pueden variar periódicamente. Las de descarga pueden pasar a ser de recarga en acuíferos extensos como en la Sabana. La descarga se puede actualizar con los datos de los pozos a partir de 1990. Las reservas se cuantificarán a partir de los mapas digitales y datos procesados en la exploración.

La evaluación del agua subterránea requiere utilizar modelos. Los casos históricos previos ilustran satisfactoriamente el tema. Sin embargo, y de acuerdo con BARBER (1992), previamente deberá definirse la necesidad de un modelo y lo que es más importante, si se dispone de una base de datos o si ésta se justifica para construir un modelo, teniendo en cuenta su potencial para incrementar la precisión del análisis.

La modelación es básicamente un método para simular el balance hidrodinámico. Es evidente que la credibilidad del balance reflejará la exactitud con que se pueden estimar todos sus componentes y varios de ellos suelen ser muy difíciles de estimar con precisión aceptable. Debe destacarse que la modelación no mejora la calidad de los datos deficientes, pero olvidando ésto a menudo se concede excesiva credibilidad a los resultados de modelos formados con tales datos (BARBER *op. cit.*).

Se recomienda hacer modelos para cuencas o subcuencas con continuidad hidráulica regional, para poder realizar una interpretación correcta de los parámetros en estudio. La *continuidad hidráulica regional* es una propiedad de los cuerpos rocosos, que se cuantifica como la relación entre el cambio inducido en la carga hidráulica en un punto de observación respecto al producido en el punto de origen. Un cuerpo rocoso se considera continuo hidráulicamente, a una cierta escala de tiempo, si un cambio de carga hidráulica en cualquiera de sus puntos puede producir un

cambio en cualquier otro punto, en un intervalo de tiempo medible a una escala de tiempo específica (TÓTH 1995).

## MONITOREO

Generalmente se monitorean tres parámetros simultáneamente, con medidas periódicas: 1) Los niveles de agua; 2) los caudales de explotación y 3) los cambios en la calidad química del agua.

En el estudio de Ingeominas no se midieron los niveles; se midieron los caudales en los puntos de agua inventariados entre 1989-1990, y se estudió la calidad del agua de los acuíferos, con muestras tomadas en puntos de agua representativos de cada uno.

Para llevar a cabo el monitoreo se requiere una red de pozos de observación técnicamente diseñada. Lo más práctico y económico es utilizar los pozos ya terminados. En algunas ocasiones se justifica perforar pozos especiales de monitoreo. En el caso presente, es prudente y suficiente iniciar el monitoreo con los pozos existentes. Esto permitirá justificar, en un futuro no muy cercano, la perforación de pozos de monitoreo.

BARBER (1992) añade que el análisis de los datos de monitoreo de los niveles debe estar orientado a la identificación de los efectos de bombeo, advirtiendo oportunamente las tendencias de los niveles, que de mantenerse, pudieran tener un impacto económico inaceptable a largo plazo. Sin embargo, es común que haya alarma ante abatimientos relativamente pequeños, olvidando que algún descenso en los niveles es el precio que se debe pagar por cualquier desarrollo significativo de agua subterránea.

Si hay grandes descensos en los niveles podría ocasionarse algún tipo de daño o efecto negativo. Si se manifiestan grandes depresiones en los niveles, pueden suceder situaciones similares a los fenómenos ilustrados en Israel, Londres y Estados Unidos.

Sobre el monitoreo de los volúmenes de explotación, éstos se deben conocer y actualizar periódicamente, con base en los inventarios de puntos de agua, en la información de los usuarios y en mediciones directas de campo. El inventario existente se cree que sea posible actualizarlo con los datos que envían o deben enviar los particulares.

Para realizar el monitoreo de la calidad del agua, se puede partir de la hidrogeoquímica existente, que se considera confiable. Puede complementarse tomando mediciones de conductividad eléctrica. Los cambios en la

conductividad eléctrica indicarán la necesidad de realizar análisis completos. Si hay peligro de contaminación de acuíferos, se recomienda también iniciar los estudios correspondientes.

LLAMAS (1992) afirma que la explotación intensiva del agua subterránea puede causar daños. Sin embargo, los beneficios producidos por la explotación de agua subterránea suelen ser mayores que los posibles daños. No obstante, estos daños pueden suceder y en lo posible deben ser corregidos o reducidos. Los daños o efectos negativos los clasifica en tres grandes grupos: a) Descenso progresivo y continuado de los niveles de agua en los pozos de bombeo; b) deterioro de la calidad del agua; y 3) subsidencia o colapso de la superficie del terreno. El colapso sucede en terrenos cársticos. A éstos se puede añadir un cuarto grupo que es el referente a los impactos ecológicos negativos en algunos ecosistemas muy particulares.

Los remedios o acciones correctivas exigen siempre y en primer lugar un conocimiento suficiente del funcionamiento de los sistemas acuíferos, lo cual rara vez ocurre, porque los datos básicos son deficientes o porque hay escasez de verdaderos hidrogeólogos en las instituciones responsables de la gestión del agua subterránea. Frecuentemente se dan todas estas causas combinadas (Llamas *op. cit.*).

Las soluciones según Llamas (*op. cit.*), pueden consistir en alguna o varias de las siguientes acciones: a) Nueva localización de pozos; b) recarga artificial de los acuíferos; c) uso de aguas residuales previamente tratadas; d) ahorro de agua mediante la modernización de los sistemas de riego o de abastecimiento urbano o industrial.

La recarga artificial es un programa que hay que estudiar e iniciar. Es una manera de aumentar la infiltración natural en los acuíferos. Se hace, generalmente, con agua superficial sobrante en períodos intermitentes de avenidas. Su costo es alto, pero según LEHR (1991) compite ventajosamente con los costos de construcción de almacenamientos superficiales. También puede ser un efecto complementario con la inyección de aguas servidas previamente tratadas y un control de las aguas de inundación. LEHR (*op. cit.*) sugiere, inclusive, que se podrían obtener los límites de rendimiento seguro (*sic*) en cuencas de agua subterránea deprimida, con un sistema perenne de recarga artificial.

Las aguas servidas hay que tratarlas antes de verterlas a las corrientes superficiales, principiando por los vertimientos que se hacen en los 380 Km. del río Bogotá, y utilizarlas también en irrigación. Este es otro proyecto en



que ha faltado voluntad política y posiblemente recursos para realizarlo.

La recarga artificial y el tratamiento de aguas servidas para utilizarlas, se hace rutinariamente en varios países; en los casos históricos previos se encuentran ejemplos en los Estados Unidos, Israel, México y Londres.

Continuando con LLAMAS (1992): La puesta en marcha de las soluciones anotadas puede resultar difícil en cualquier país, pero especialmente en aquellos en vías de desarrollo. Contribuyen a ello varios factores. Uno importante es la carencia de adecuados conocimientos hidrogeológicos por parte de los técnicos de las instituciones responsables de la política del agua de la región y de los usuarios de las aguas subterráneas, que suelen ser muchos. Otro factor relevante suele ser el generalizado sentido privado del agua subterránea, independiente de la calificación jurídica que tenga en las leyes de cada país. Este sentimiento lleva a los usuarios a no considerarla como bien común que tiene que ser gestionado conjuntamente por todos los usuarios reales o potenciales del mismo acuífero. Ante esta actitud insolidaria, algunos gobiernos han reaccionado promulgando leyes muy estrictas, cuya aplicación suele ser imposible, bien sea por la falta de medios en las instituciones responsables de hacerlas cumplir, o bien por la presión de los usuarios sobre los gobernantes elegidos democráticamente por ellos mismos.

En pocas palabras (LLAMAS *op. cit.*), la gestión de las aguas subterráneas deberá ser realizada mediante una estrecha colaboración entre la Administración y los usuarios, a los que hay que procurar educar adecuadamente en los principios básicos de la hidrogeología. En los países menos desarrollados y/o menos democráticos existe un gran peligro de que triunfe entre sus dirigentes el mito del peligro de la sobreexplotación de las aguas subterráneas y se busquen soluciones a base de megaproyectos con aguas superficiales.

## CONTROL DE LA EXPLOTACION

Para controlar la explotación, la legislación actual se aplica en la Sabana de manera deficiente e incompleta. Para aplicar este control, todos los pozos existentes deben estar autorizados e inventariados. El permiso de perforación y terminación de los pozos debe ser expedito y las entidades responsables deben actuar eficazmente. No hacerlo ha ocasionado la perforación de pozos clandestinos, que periódicamente se tratan de legalizar por medio de amnistías. Método improcedente, que causa más pozos ilegales.

En el Distrito Capital se permite la perforación de pozos

únicamente para aprovechar los acuíferos del Grupo Guadalupe. Conviene recordar, entonces, que el Guadalupe puede estar a profundidades tan grandes que resulta no rentable perforar pozos. Además, varias capas del Guadalupe no contienen acuíferos; y dentro del D. C. hay otros acuíferos en el Cuaternario-Terciario que se pueden explotar.

Estas normas, parece que se han tomado para evitar la subsidencia, fenómeno que es urgente estudiar, antes de improvisar sus causas. No toda subsidencia es causada por descensos en los niveles, la mayoría de los asentamientos en la Ciudad y posiblemente en la Sabana, podrían ser causados por diferentes efectos geotécnicos a que están sometidos los suelos arcillosos y lacustres presentes.

A su vez, para realizar un control efectivo del volumen de agua explotada se debe fijar, para cada pozo, un volumen autorizado, el cual debe ser monitoreado.

Se está considerando el cobro del agua subterránea. Esto puede evitar el despilfarro y mejorar la utilización del agua, además de proporcionar recursos adicionales a las entidades gubernamentales. Pero con el estado actual de desconocimiento del funcionamiento de los acuíferos no es recomendable, todavía, llevarlo a cabo. Antes de establecer el cobro de las aguas subterráneas, se requiere realizar un estudio de hidroeconomía y establecer la manera de calcular su valor. Los pozos son inversiones económicas que deben seguir siendo rentables, para que continúe su utilización. Sería ideal tener precios reales para el agua subterránea; sin embargo, algunos países la subsidian, como Israel. El sector agropecuario está produciendo con precios no competitivos internacionalmente, y las flores han sufrido los fenómenos de la revaluación irreal del peso. Gracias al aprovechamiento del agua subterránea en la Sabana, la floricultura ha llegado a ser un importante renglón de exportación que ha permitido generar 75.000 puestos directos de trabajo con exportaciones anuales de 160.000 toneladas de flores. Igualmente, el aprovechamiento del agua subterránea ha permitido instrumentar y desarrollar importantes fábricas de cerveza, bebidas gaseosas y alimentos procesados.

Existe el temor de que se estén extrayendo reservas de agua subterránea en la Sabana, lo que se ha llamado una sobreexplotación. Es un temor que proviene del desconocimiento del funcionamiento de los acuíferos. Se podría hablar de sobreexplotación si se conoce cabalmente una cuenca hidrogeológica. No es el caso de la Sabana de Bogotá.

Referente a la expresión *sobreexplotación* dice LLAMAS (1992) que encierra muy diversos significados según diferentes autores. En cierto modo es una expresión más emocional que científica. Por ello su adecuada definición es difícil, por no decir imposible. Se ha utilizado con frecuencia para describir únicamente los supuestos efectos negativos de una explotación de aguas subterráneas, ignorando o silenciando los correspondientes efectos positivos que muchas veces superan ampliamente esos efectos negativos. Añade que después del Congreso sobre Sobreexplotación de Acuíferos, realizado en las Islas Canarias en 1992, reitera que convendría abandonar el uso del término *sobreexplotación*, pues no tiene una definición adecuada uniforme que, al mismo tiempo, tenga un valor práctico. En su lugar deberían utilizarse otras expresiones que describan el correspondiente proceso con mayor claridad, como: explotación intensiva temporal, explotación de reservas no renovables, explotación no sostenible desde el punto de vista económico, explotación que produce grave impacto ecológico, explotación que induce una subsidencia o colapso del terreno, etc.

También es conveniente anotar que la explotación intensiva planificada de acuíferos es aceptada si se realiza bajo condiciones económicas y técnicas controladas de manera satisfactoria, posiblemente mediante modelación. En las Jornadas sobre las Sequías organizadas en España, algunos participantes, entre ellos NAVARRO (1991) cita la explotación intensiva entre las medidas para aliviar las sequías. Pero también llama la atención sobre los riesgos que esto implica. Las dificultades han aparecido cuando se sobreexplota (*sic*) el agua subterránea produciéndose un descenso en los niveles de extracción. La sobreexplotación es una consecuencia de la política de obtener máximos beneficios actuales, junto con una rápida depreciación de la inversión. Un factor, que en cierto, modo puede controlar la sobreexplotación es un aumento de costos al bombear desde mayores profundidades.

SAHUQUILLO (1991) propone como acciones mitigantes de los efectos adversos de la sequía, considerar simultáneamente, pero con un cierto orden de preferencia, tres grandes grupos: a) Disminuir el despilfarro o mal uso del agua. b) Aumentar los recursos hídricos disponibles, especialmente mediante el uso conjunto (o alternado) de aguas superficiales y subterráneas, y c) Aumentar la educación hidrológica del público en general y fomentar su adecuada participación en la gestión del agua a través de los organismos responsables de administrar el recurso. Concluye que la solución de los problemas del agua ha de basarse tanto en la sabiduría (ciencia hidrogeológica) como en la solidaridad con las generaciones presentes y futuras.

En Londres, según se anotó, el agua subterránea será utilizada, mediante pozos (también son de recarga), durante las sequías previstas y así se hace en las Praderas Altas y en Israel.

En la actual sequía que sufre la Sabana, y todo el país por el fenómeno de El Niño, se deberían utilizar las enormes reservas de los acuíferos, con bombeos intensos y prolongados, los cuales se detendrían en el futuro, cuando regresaran las lluvias, permitiendo la recuperación, parcial o total, de los acuíferos, según se deduce del análisis de la fórmula de Theis. Esta posibilidad, sin embargo, no se aprovecha. El gobierno nacional no ha considerado utilizar pozos para irrigación durante las sequías, tal vez porque se desconoce el recurso agua subterránea. La solución a la sequía actual, con la consecuente disminución o carencia de alimentos, se piensa obtener con la importación de estos últimos. Las importaciones de alimentos han crecido de 1,2 x 10<sup>6</sup> toneladas en el 90 a 5,05 x 10<sup>6</sup> toneladas en el 96.

En la actual emergencia a que está sometida la ciudad de Bogotá, por un problema de conducción de agua a través de túneles, no revestidos ni mantenidos correctamente, el agua subterránea, con sus reservas, pudo ayudar a paliar la crisis con bombeos continuos y prolongados, si hubiera pozos o se hubieran perforado. Las reservas se pueden utilizar satisfactoriamente para abastecer barrios, escuelas, cuarteles, universidades, o pueblos de la Sabana. Sin embargo, la desconfianza de los planificadores y autoridades, que aflora al tener un desconocimiento de los acuíferos, está impidiendo aprovecharlas.

Los principales acuíferos de la Sabana, están en el Grupo Guadalupe, las Formaciones Tiltatá y Arenisca del Cacho, y las Formaciones Sabana y Subachoque; las dos últimas son las más explotadas y contienen los pozos con caudales más bajos. Los caudales son muy variables en los pozos de la Sabana. Los mayores caudales los producen los pozos que aprovechan los acuíferos del Guadalupe entre 1 y 35 LPS; y los de la Formación Tiltatá entre 1 y 40 LPS. Las capacidades específicas de los pozos en ambos casos varían entre 0,04 y 1,94 litros/segundo x metro. Los pozos en el Guadalupe tienen entre 42 y 1090 m de profundidad; en la Formación Tiltatá entre 200 y 600 m (ROBLES & ALVAREZ 1993 p. 24). La inversión requerida para la terminación de pozos es de unos \$350.000/metro (US\$ 290/m).

Aunque no es el caso de la Sabana, se ilustra según BARBER (1992) lo que se llama *minería* o *minado del agua subterránea*. Se refiere a situaciones en que el agua del subsuelo es extraída continuamente en volúmenes mayores

que la recarga natural, si existe, a costa de las reservas almacenadas, provocando, en consecuencia, el descenso progresivo de sus niveles de agua. Dicho término también se aplica a algunas situaciones en que la explotación de agua de buena calidad induce el avance de agua salina hacia los acuíferos y los contamina. La minería del agua subterránea se justifica si existe una fuente sustitutiva de agua, que puede ser desarrollada una vez que se alcance una economía sólida, basada en la extracción de la fuente subterránea a costo realivamente bajo, como en el caso del Valle de San Joaquín en California (BARBER *op. cit.*). En el caso histórico de Libia se realizó con la seguridad de que puede proveerse una fuente alterna con agua desalinizada o con importación de agua dulce de distancias considerables. En Algeria y Túnez se hace minería de las enormes reservas, que si no se extraen, no producen beneficio alguno. En las Praderas Altas se está vaciando el agua subterránea, hasta el límite de su explotación económica, y así se ha sostenido una agricultura altamente rentable, por muchos años.

Debe anotarse, sin embargo, que los países que han llevado a cabo una minería del agua subterránea sistemática, tienen, por lo general, economías ricas o no tienen otra fuente de abastecimiento (BARBER *op. cit.*).

El control de la explotación del agua subterránea, sus beneficios y aspectos negativos, es evidente que se puede realizar únicamente con profesionales y técnicos del Departamento de aguas subterráneas recomendado previamente, y obtener así las bases que permitirán administrar bien el agua superficial y subterránea. La modelación también es fundamental para estos fines.

## REFORESTACION

Las leyes actuales (Ley 189 del 94, Decreto 1824/94) propician la reforestación, que debería ser un propósito nacional inaplazable; sin embargo, no se progresa especialmente al respecto. Según BARBER (1992), existe la creencia general de que los árboles por sí mismos son útiles y por ello deben ser preservados. Continuamente se destacan los beneficios de su conservación, tanto para el agua superficial como para la subterránea, pero algunas veces se sobrevalora su utilidad. Sin embargo, desde el punto de vista del balance de agua, debe aceptarse que los árboles son consumidores de agua. Si el bosque conserva más agua que la que consume, su presencia física puede considerarse como un beneficio. Pero cuando ocurre lo contrario, los beneficios de conservar el bosque deben ser comparados con los de un uso alternativo del terreno. Por otro lado, los árboles han sido utilizados exitosamente para proveer un drenaje a tierras inundadas, incrementando así su valor de producción. Es conveniente, por lo tanto, conocer

las especies que benefician la presencia y conservación del agua y propiciar su siembra y cultivo. Las que no lo hacen deberían desecharse.

## CONCLUSIONES

Se han presentado casos históricos sobre el desarrollo y gestión del agua subterránea en varios países, donde se conoce el funcionamiento de los acuíferos y donde se utilizan de manera programada las reservas existentes. En algunos países se hace minería del agua subterránea. Para cualquier caso se conoce la cantidad de agua que se programa bombear, los beneficios y efectos negativos esperados, a los cuales se dan soluciones y remedios.

En la Sabana de Bogotá se explota el agua subterránea sin un conocimiento satisfactorio del funcionamiento de los acuíferos. Y a pesar de haber recursos y cuantiosas reservas de agua subterránea no se han utilizado suficientemente para abastecimiento humano, para el desarrollo industrial, o para riego en tiempo normal, ni para mitigar las crisis de agua de la Ciudad ni de la Sabana.

Las reservas existentes de agua subterránea en la Sabana pueden utilizarse durante períodos largos con bombeo intenso, bajo el concepto de desarrollo durable o sostenible. Se recuperarán parcial o totalmente, en períodos de lluvia. Lo que se requiere, siempre, es programar su utilización, conocer y prever los beneficios, así como los eventuales efectos negativos de su uso, para dar soluciones y aplicar remedios.

Para conocer satisfactoriamente la hidrogeología de la Sabana y realizar la gestión del agua subterránea adecuadamente, es necesario que las entidades gubernamentales responsables organicen Departamentos de Aguas Subterráneas, que acometan con sus profesionales y programas permanentes, los estudios y acciones que permitan adquirir conocimientos y experiencia en hidrogeología y en la cuenca misma. Departamentos que considerarán también las aguas superficiales para utilizarlas en conjunto con las subterráneas.

Se propone completar el estudio hidrogeológico de Ingeominas con la información de los pozos perforados y con estudios adicionales, algunos hechos por modelación, para cumplir los objetivos de conocimiento y gestión del agua subterránea en la Sabana.

Las autoridades responsables deben aplicar las leyes vigentes y actuar con eficacia para cumplir sus deberes con los usuarios, y a éstos se debe educar en los principios fundamentales de la hidrogeología para que entiendan sus

obligaciones en la utilización del agua subterránea como bien común y con el enfoque de desarrollo durable.

## AGRADECIMIENTOS

Al editor de la revista, geólogo Jorge Brieve, quien corrigió y mejoró el manuscrito.

## REFERENCIAS

- ANONIMO (1988): Río Artificial para Libia.- Desarrollo Nacional, mayo 1988, p. 16-19.
- ALVAREZ OSEJO, A. (1993): Hidrogeología del Sector Sisga, Tibitó y Embalse de Tominé. Sabana de Bogotá.- Ingeominas. Inf. sin número, ps. 194, Figs. 29. Tbs. 27. Pls. 25. Anexos 6. Inédito.
- BARBER, W. (1992): Desarrollo y Manejo de Recursos Hidráulicos Subterráneos.- Ingeniería Hidráulica en México, v. VII, n. 1, p. 9 - 23.
- CARREÑO, J. (1992): Resumen Hidrogeológico de la Sabana de Bogotá.- Hidrominas Ltda, p. 8, Figs. 2. Inédito.
- CANALES, A. G. (1991): Sobreexplotación y Manejo del Agua Subterránea en Mexico.- AIH, Congreso Internacional XXIII. Actas, Tomo 1, p. 275-279.
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, M. R. (1976): Hidrología Subterránea.- Tomos I y II. Ediciones Omega, S. A., Barcelona, p. 2359.
- EAAB, Gerencia de Planeamiento (1996): Plan Maestro de Abastecimiento de Agua.- Informe de la EAAB, inédito, p. 101.
- EL-BARUNI, S. S. (1995): Deterioration of Quality of Groundwater from Suani Wellfield, Tripoli, Lybia, 1976-1993.- Hydrogeology Journal, v. 3, n. 2 p 58 -64.
- FOSTER, S.S.D. (1991): Unsustained Development and Irrational Exploitation of Ground Water Resources in Developing Nations.- IAH-XXIII International Congress, Proceedings, v. 1, p. 385- 401.
- GUTENTAG, E. D. *et al.* (1984): Geohydrology of the High Plains Aquifer in Parts of Colorado, Kansas, Nebraska, New Mexico, Oklahoma, South Dakota, Texas, and Wyoming.- U. S. G. S. Professional Paper, 1400-B, p. 63.
- HELMENS, K. F., & VAN DER HAMMEN, T. (1995): Memoria Explicativa para los Mapas del Neógeno-Cuaternario de la Sabana de Bogotá. Cuenca Alta del río Bogotá.- IGAC. Análisis Geográficos, n. 24, p. 91-142.
- JOHNSON, K. S. (1991): Exploitation of the Tertiary-Quaternary Ogallala Aquifer in the High Plains of Texas, Oklahoma, and New Mexico, SW. U.S.A.- IAH-XXIII International Congress. Proceedings, v. 1, p. 313-328.
- JOHNSTON, R. H. (1997): Sources of Water Supply Pumpage from Regional Aquifer System of the United States.- Hydrogeology Journal, v. 5, n.2, p. 54 - 63.
- KAZMANN, R. G. (1965): Modern Hydrology.- Harper & Row, Publishers. New York, p. 301.
- KOZLOVSKY, E. A. (ed.) (1988): Geology and the Environment.- UNESCO. UNEP, p. 179.
- LEHR, J. H. (1991): Perceived Aquifer Overexploitation is in Reality Mismanagement, Commonly Correctable by Artificial Recharge and Well Field Design.- AIH-Congreso Internacional XXIII, Actas Tomo I, p. 329-338.
- LERNER, D. N. & BARRETT, M. H. (1996): Urban Groundwater Issues in the United Kingdom.- Hydrogeology Journal, v. 4, n. 1, p. 80-89.
- LUCKEY, R. R. *et al.* (1986): Digital Simulation of Ground Water Flow in the High Plains Aquifer in Parts of Colorado, Kansas, Nebraska, New Mexico, Oklahoma, South Dakota, Texas and Wyoming.- U.S. G. S. Professional Paper, 1400-D, p 57.
- LUCKEY, R. R. *et al.* (1988): Effects of Future Ground Water Pumpage on the High Plains Aquifer in parts of Colorado, Kansas, Nebraska, New Mexico, Oklahoma, South Dakota, Texas, and Wyoming.- U. S.G.S. Professional Paper, 1400-E, p. 44.
- LLAMAS, M. R. (1992): La Sobreexplotación de Aguas Subterráneas.- Riegos y Drenajes, Barcelona, n. 61, p. 18-30.
- LLAMAS, M.R. *et al.* (1992): Groundwater use: Equilibrium Between Social Benefits and Potential Environmental Costs.- Applied Hydrogeology, v. 1, n. 2, p. 3-14.
- MARGAT, J. (1991): La Sobreexplotación de Acuíferos. Su Caracterización a Nivel Hidrogeológico e Hidroquímico.- AIH-XXIII Congreso Internacional. Actas.
- MOLANO, C. & MOSQUERA, F. (1984): ¿ Qué cantidad de Agua Subterránea se Puede Explotar de la Sabana de Bogotá ?- Tribuna Geológica, Agunal.
- NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY RESEARCH & EXPLORATION (1993): Water Issue, Rain-rich, Rain-poor Map, v. 9.
- NAVARRO, A. (1991): Cambios en la Calidad y en la Cantidad de las Aguas Subterráneas por Efecto de las Sequías.- Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid. Tomo LXXXV, p. 387-411.
- NIÑO, J. *et al.* (1978): Evaluación de las Aguas Subterráneas en la Sabana de Bogotá.- Trabajo de Grado, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, ps. 87, Figs. 22, Pls. 5. Anexos 2. Inédito.
- REYES, I. (1993): La Tectónica y su Influencia en la Recarga de los Acuíferos Profundos de la Sabana de Bogotá.- IV Simposio Colombiano de Hidrogeología y III Conferencia Latinoamericana de Hidrogeología Urbana. Memorias, Tomo I, p. 32-42. Publicación de Ingeominas.
- ROBLES, E. & ALVAREZ, A. (1993): Hidrogeología de la Sabana de Bogotá.- IV Simposio Colombiano de Hidrogeología y III Conferencia Latinoamericana de Hidrogeología Urbana. Memorias, Tomo I, p. 1-27. Publicación de Ingeominas.
- ROBLES, E. & ALVAREZ, A. (1994): Recursos y Reservas de Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá.- Ingeominas, Informe en borrador. Ps. 109, Figs. 20, Tabs. 27.

- SAHUQUILLO, A. (1991): La Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas en la Mitigación de los Efectos de las Sequías.- Revista de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid. Tomo LXXXV, p. 275-291.
- SCHWARZ, J. (1992): Management of the Water Resources of Israel.- Israel Journal of Earth Sciences, v. 39, p. 57-65.
- STRUCKERMEIER, W.F. & MARGAT, J. (1995): Hydrological Maps, a Guide and Standard Legend.- AIH, v. 17, p. 178, Heise, Hannover.
- THEIS, C. V. (1940): The Source of Water Derived from Wells.- Civil Engineering, v. 10, n. 5, p. 277-280.
- TOTH, J. (1995): Hydraulic Continuity in Large Sedimentary Basins.- Hydrogeology Journal, v. 3, n. 4, p. 4-15.
- UNESCO (1978): World Water Balance and Water Resources of the Earth.- Unesco Press, Paris, p.663.
- WEEKS, J. B. *et al.* (1988): Summary of the High Plains Regional Aquifer-System Analysis in Parts of Colorado, Kansas, Nebraska, New Mexico, Oklahoma, South Dakota, Texas, and Wyoming.- U.S.G.S. Professional Paper, 1400-A, p. 30.
- ZWINGLE, E. (1993): Ogallala Aquifer, Wellspring of the High Plains.- National Geographic, v.183, n. 3, p. 81-91.

*Manuscrito recibido, septiembre de 1997.*