

Las aguas subterráneas en la planificación de recursos hidráulicos: el uso conjunto^(*)

Por ANDRES SAHUQUILLO HERRAEZ

Ingeniero de Camininos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Valencia

Muchos planificadores de recursos hidráulicos no tienen en cuenta o infravaloran los recursos hidráulicos subterráneos. En muchos casos detrás de las razones que se exponen subyace una falta de confianza en su potencial y en la capacidad de la tecnología actual para predecir su comportamiento. La superficie ocupada por los acuíferos y el hecho de que proporcionan el 30 por 100 del caudal de los ríos, son argumentos suficientes para defender la utilización de los recursos subterráneos. También se puede afirmar que con las técnicas existentes de evaluación de las aguas subterráneas y la disponibilidad de modelos y métodos de simulación, es posible valorar el impacto de la explotación continuada de los acuíferos, con al menos el mismo grado de precisión que los métodos usados para el agua superficial.

Frecuentemente las aguas subterráneas son económicamente más favorables que las superficiales; sin embargo, en las regiones donde el agua es escasa, la solución debe ser la colaboración y no la competencia. El enfoque correcto es la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas. Con el uso conjunto se pueden obtener recursos adicionales, y disponer de elementos adicionales de almacenamiento de agua, de distribución y de tratamiento, y además conseguir una mayor eficiencia en la gestión de los recursos hidráulicos.

LA CONTROVERSIA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Las necesidades crecientes de agua, las restricciones impuestas por la contaminación y el coste de construcción de las obras hidráulicas, incluido el de hacer frente a las preocupaciones ambientales y sociales han aumentado dramáticamente. Por estas razones, se hace necesario tomar en cuenta todas las fuentes de agua y las alternativas para aprovecharlas para satisfacer las demandas actuales y futuras.

En los últimos años se han desarrollado debates muy vivos en publicaciones y reuniones técnicas sobre el papel de las aguas superficiales y subterráneas en el desarrollo y gestión de los recursos hidráulicos de una cuenca o región, y de vez en cuando el problema sale a la luz en las revistas o prensa diaria.

Los expertos en aguas subterráneas tienden a defender distintos puntos de vista. Frecuentemente sus argumentos están basados en cifras sobre la enorme cantidad de agua almacenada en algunos acuíferos, la capacidad de almacenamiento de los acuíferos comparada con la de embalses existentes o propuestos, sus recursos potenciales, la ausencia de evaporación, las posibilidades de explotación sin elevados costes de construcción, mayor protección sin elevados costes de construcción, mayor protección contra la contaminación, etc... En la opinión del autor, estas comparaciones son de valor muy limitado. Lo que debe influir en la toma de decisiones es un análisis estricto de los aspectos funcionales, económicos, legales y ambientales de las distintas opciones y de la posibilidad de satisfacer los objetivos propuestos.

A veces se dan argumentos más concretos, poniendo en duda la necesidad de presas o canales costosos, cuando se podía haber resuel-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de marzo de 1987.

to el problema de forma más fácil y económica usando agua subterránea local (1,2). El autor conoce algún proyecto de riego en España en el que se planificó la construcción de presas o canales costosos sin tener en cuenta el hecho de que más del 90 por 100 de la zona estaba ya regada de forma suficiente y económica con agua subterránea y que no eran previsibles problemas de calidad o sobreexplotación. En todos los países existen casos análogos independientemente de su grado de desarrollo o status político, en los que se podría haber conseguido una solución más económica y eficiente utilizando las aguas subterráneas.

ARGUMENTOS CONTRA LA UTILIZACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Un análisis de las decisiones y actitudes de los planificadores de recursos hidráulicos, indica que la mayoría favorecen la utilización del agua superficial. Con mucha frecuencia las aguas subterráneas no son tenidas en cuenta incluso en regiones en las que existen estudios profundos y confiables que han confirmado la existencia de acuíferos interesantes. Este olvido injustificado de las aguas subterráneas evidencia un profundo e impremeditado prejuicio (3).

Esta actitud, que es común en muchos países, ha sido llamada hidroesquizofrenia por Nace y analizada por Llamas (4).

También existen las actitudes opuestas. Con frecuencia el potencial real de las aguas subterráneas se ha sobreestimado; no se ha tenido en cuenta el efecto de bombeos en los niveles freáticos y sobre los caudales superficiales; o se ha propuesto su integración sin estudiar con detalle suficiente las interrelaciones con otros componentes del sistema de recursos hidráulicos.

Son corrientes las siguientes objeciones para justificar la exclusión del agua subterránea en la planificación hidráulica.

- Es difícil conocer las características del agua subterránea y cómo responderán los acuíferos cuantitativa y cualitativamente a la explotación.
- La explotación del agua subterránea reduce el caudal de los ríos.

- La explotación del agua subterránea es costosa y consume energía.
- En los países áridos los acuíferos se sobreexplotan y eventualmente la calidad del agua se deteriora.
- La gestión de las aguas subterráneas es mucho más difícil porque un acuífero puede tener cientos o miles de pozos. Esto requerirá no sólo más personal sino también más especializado.
- A no ser que se declare pública el agua subterránea, será muy difícil si no imposible, incluirla en la planificación de los recursos hidráulicos.

Las objeciones anteriores son en cierto modo correctas y pueden aplicarse a muchas situaciones, pero una generalización no resiste un análisis imparcial. En los párrafos que siguen se darán una serie de razones en favor de la utilización conjunta con las superficiales y otros recursos de agua; pero aquí ofrecemos dos argumentos más generales que son incontestables.

Primero, el porcentaje de escorrentía subterránea en relación a la total es del 31 por 100 a escala mundial, y a escala continental los porcentajes varían entre el 26 por 100 de Asia, al 35 por 100 de Sudamérica. El segundo argumento se refiere a la utilización actual del agua subterránea para satisfacer las necesidades urbanas, industriales o agrícolas en el mundo (5). Hay que recalcar que en áreas como California, el Reino Unido o Israel, el agua subterránea juega un papel importante en la planificación hidrológica global y que existe un interés creciente por el agua subterránea en otras partes del mundo. Hay que resaltar la alta proporción con la que el agua subterránea contribuye a los abastecimientos públicos en muchos países del Norte y Centro de Europa con pluviometrías elevadas. A veces esta proporción sobrepasa el 70 por 100, lo cual se debe en parte a la contaminación de los ríos. Parece que al menos compensa estudiar las aguas subterráneas con la profundidad necesaria en cada caso particular antes de decidir cual debería ser su contribución a la solución de ese problema concreto. En España la componente subterránea del caudal de nuestros ríos es del orden del 20 por 100 y satisfacen del orden del 24 por 100 del total de usos consumptivos. También el interés por su

utilización ha aumentado de forma espectacular en los últimos años.

RAZONES PARA EL OLVIDO DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Las actitudes descritas se deben en parte a una falta de comprensión de la existencia y movimiento del agua subterránea. La mayoría de los ingenieros hidráulicos tienen una experiencia limitada en estudios de aguas subterráneas y muchos no han tenido ninguna educación formal en hidrología, incluso cuando son frecuentes entre ingenieros y geólogos las llamadas para aumentar estudios en hidrogeología. En su situación presente la hidrogeología ha alcanzado la madurez, y las técnicas de evaluación de las aguas subterráneas están muy desarrolladas y se aplican de forma rutinaria en todo el mundo. Los modelos han llegado a ser instrumentos para valorar el impacto de los bombeos de aguas subterráneas, la relación entre aguas superficiales y subterráneas y la migración de contaminantes químicos. Sin embargo, la hidrogeología es una ciencia joven y con frecuencia hay lapsos entre la introducción de una técnica nueva y su aplicación subsecuente. Los recursos subterráneos sufren la desventaja adicional de ser recursos escondidos que no pueden medirse directamente. Las técnicas necesarias para evaluar los recursos de aguas subterráneas requieren más abstracción, aunque no son más complicadas y son tan confiables como los métodos usados para analizar las aguas superficiales.

En algunos países la responsabilidad de la planificación hidráulica ha sido asumida por el gobierno central, al menos a la hora de tomar las últimas decisiones en los proyectos más importantes, y las aguas subterráneas son utilizadas casi exclusivamente por particulares o agencias locales. Los grandes proyectos corrientemente tienen mayores recursos y también gozan de mejor trato financiero; estas consideraciones además de las motivaciones políticas tienden a favorecer los grandes proyectos ingenieriles más espectaculares.

Debido a la existencia de numerosos pozos y usuarios, la gestión de las aguas subterráneas

puede sin duda complicar la gestión de un sistema de recursos hidráulicos. Además, muchas agencias se resisten a sacar ventajas de las aguas subterráneas porque no tienen personal técnico entrenado convenientemente para esta tarea, lo que también añade un elemento distorsionante adicional. Se suele oír que para gestionar los recursos hidráulicos de forma eficaz, es preciso modificar primero la legislación de aguas, declarando públicas a las aguas subterráneas. Es obvio que una ley «perfecta» resuelve muchas dificultades, pero sería un error parar todas las actividades hasta conseguir este ideal. Todos los gobiernos tienen numerosos mecanismos a su disposición para poder desarrollar las soluciones más adecuadas para el bien público en el caso de competencia con los propietarios de aguas subterráneas.

Hasta la reciente aprobación de la Ley de Aguas se oía decir que para gestionar adecuadamente las aguas subterráneas, había que hacerlas públicas. Yo he dicho que era una coartada más o menos consciente, y a mi entender no era necesaria para hacer una gestión eficaz. El caso de California así lo prueba. Por el contrario el excesivo intervencionismo y la «necesidad» de controlar administrativamente cientos de miles de pozos puede muy bien convertirse en una trampa que justifique una vez más el inmovilismo en este campo.

En opinión de quien escribe, las medidas legales por si solas no garantizan la gestión eficaz de los recursos hidráulicos, sino la determinación firme de hacerla.

INFORMACION E INCERTIDUMBRE

Wiener (3) ha puesto de manifiesto de forma brillante los siguientes puntos relativos a la necesidad de información y a la incertidumbre que existe al tomar decisiones relativas a la utilización de aguas superficiales y subterráneas.

- a) En la mayoría de los casos, el caudal de un río representa una respuesta rápida a fenómenos climáticos. Normalmente, la información que se puede obtener de los datos de aguas subterráneas recogidos a lo largo de pocos años es más confiable, si se analizan adecuadamente, que la proporcio-

nada por los datos de aguas superficiales recogidos durante periodos de tiempo más largos. la inercia de los acuíferos causada por la gran cantidad de agua que almacenan, integra largos periodos de fenómenos hidrometeorológicos y la recogida de datos durante periodos cortos puede proporcionar una información global mucho mejor.

- b) La fluctuación de los flujos es mucho mayor en las aguas superficiales que en las aguas subterráneas. No es posible hacer predicciones a plazos medio o largo de caudales de ríos. Su naturaleza es estocástica por naturaleza y de esta manera su comportamiento puede tratarse únicamente en términos de probabilidad. El comportamiento del agua subterránea es mucho menos errático y más determinístico debido a las relaciones normalmente deterministas o casi deterministas entre el agua almacenada y la descarga media del acuífero.
- c) La explotación del agua subterránea requiere inversiones iniciales pequeñas; sin embargo los costos de operación son altos. La explotación de aguas superficiales requiere grandes inversiones mientras que los costos de operación son normalmente bajos.

En el caso de aguas superficiales las inversiones son normalmente indivisibles, lo cual implica un proceso muy largo para el estudio, construcción y proceso de toma de decisiones. Pueden pasar muchos años para que un proyecto comience a ser efectivo. Las grandes inversiones también imponen mayores demandas en la información requerida. Por el contrario las inversiones necesarias para el agua subterránea son divisibles y los periodos muertos son mucho más adaptables a las demandas crecientes de agua.

En los casos, comunes en todo el mundo, en los que la información hidrológica es incompleta y en los que las necesidades de agua son inciertas, las consideraciones anteriores son de importancia crucial. La recesión económica de los últimos años ha tenido una influencia decisiva en reducir la necesidades de agua previstas en muchas partes del mundo. El agua subterránea puede jugar un papel más importante

si el sistema de recursos hidráulicos es concebido dinámicamente, y las incertidumbres que existen en relación con los recursos y con la demanda se toman en consideración. Este concepto es distinto al más clásico en el que el sistema de recursos hidráulicos es concebido estáticamente con una orientación estructural.

En los últimos años se han producido algunos cambios importantes en la planificación y gestión de los recursos hidráulicos. La utilidad de las soluciones estructurales ha sido puesta en duda, se ha puesto más interés en la utilización óptima de las instalaciones existentes que en invertir en construir nuevas, y en muchos países la era de la construcción de grandes presas ha llegado probablemente a su término (8). Aunque se han hecho muy pocas evaluaciones financieras de los resultados de algunos proyectos, hay suficiente evidencia para poner en duda si los resultados de esas grandes construcciones han respondido a lo esperado. El problema del subsidio gubernamental a los grandes proyectos hidráulicos se ha criticado frecuentemente, y el primer paso para elegir una solución debería ser el análisis de las distintas alternativas disponibles.

OTROS ASPECTOS ECONOMICOS

Muy frecuentemente, se asevera que el agua subterránea es cara, cuando su coste es frecuentemente menor que la superficial. De hecho su bajo coste es frecuentemente la causa de su sobreexplotación. Se han hecho con frecuencia comparaciones entre el coste de regular 1 m³ de agua de un embalse y el obtenerla de un pozo. Para ser más riguroso también habría que considerar los costes de transporte, distribución y tratamiento, lo que tiende claramente a favorecer el agua subterránea (9). El único caso que conozco en el que se haya hecho a nivel nacional ha sido realizada en Francia, donde el coste de producción y tratamiento de agua derivada de un río resultó ser de 0.14F/m³ y sólo de 0.09F/m³ para el agua subterránea. La comparación hubiera resultado incluso más favorable si hubiese sido necesario construir embalses para regular (10).

La explotación de aguas subterráneas produ-

ce externalidades tales como la reducción en niveles de agua, reducción de los caudales de los ríos o variaciones a largo plazo en la calidad del agua subterránea en áreas de riego. Estos aspectos pueden ser tenidos en cuenta con los métodos corrientes de análisis y modelación de acuíferos (11).

Otras externalidades como las subsidiencias causadas por descensos en los niveles piezométricos son más difíciles de predecir y valorar económicamente.

La selección de la tasa de descuento a utilizar en las obras hidráulicas ha sido objeto de debates áridos. Una tasa más baja favorece los proyectos con mayor componente de aguas superficiales. Una tasa más acorde con el coste real del dinero favorece el diferir las inversiones más costosas. Por ejemplo el valor actual de una peseta que se vaya a gastar dentro de diez años es 0,257 si se aplica la tasa del 12 por 100 y 0,104 si el gasto se fuera a realizar dentro de 20 años. Si se usa la tasa del 8 por 100 los valores respectivos serían 0.463 y 0.215; y aplicando el 4 por 100 serían 0.676 y 0.456.

Los proyectos de aguas subterráneas ofrecen la ventaja de requerir menores inversiones por unidad de producto final resultante. Por esta razón representan una alternativa más adecuada en los casos en los que el capital es limitado y altas las tasas de interés, por otra parte como las inversiones involucradas son menores, el riesgo es menor con respecto a incertidumbres hidrológicas y de mercado; y como la explotación del agua subterránea puede escalonarse modificándola cuando aumente la demanda las inversiones improductivas pueden reducirse a un mínimo. Por el contrario la economía de escala es una de las obvias ventajas clásicas del agua superficial.

En los años cincuenta la mayor parte de los países usaban una tasa de descuento de tipo social, que era significativamente menor que la tasa de mercado. En los setenta se aplicaba una tasa mucho mayor al subir también el coste del dinero (12). Parece que la crisis de la energía trabajó contra el uso del agua subterránea, aunque de hecho el aumento de las tasas de descuento compensó el aumento del coste de la energía (13). En estos momentos los términos

se han invertido habiendo bajado el coste del petróleo y el del dinero.

Otros aspectos a tener en cuenta son las pérdidas de agua en el transporte y en las redes de distribución, que en general son más importantes en el caso de las aguas superficiales y en la evaporación de los embalses. En la URSS, las pérdidas atribuidas a la evaporación se han estimado en el 10 por 100 del volumen total controlado. Las pérdidas en las redes de riego se han estimado en el 16,4 por 100 en USA y hasta el 75 por 100 en el canal de Carpentras en Provenza (9).

USO CONJUNTO DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRANEAS

El enfoque correcto en este asunto no es el de escoger entre aguas superficiales o subterráneas, sino en el de determinar como utilizar ambos recursos de la mejor forma posible para resolver los problemas existentes. Como regla general las aguas superficiales y las subterráneas se han utilizado separadamente, sin embargo, hay casos bien conocidos en los que el uso conjunto ha producido resultados mucho más eficientes y su aplicación se ha propuesto en numerosas localidades (14).

En el Reino Unido se produjo un cambio radical en la utilización de los recursos hidráulicos y actualmente el uso conjunto se utiliza ampliamente y de una forma estricta y a la vez pragmática (15). Parece evidente que la inclusión del agua subterránea en un sistema de recursos hidráulicos aumenta las oportunidades para conseguir mejores resultados. La naturaleza distinta y complementaria de estos dos recursos también juega un papel importante en este asunto.

Si además de los puntos tratados antes, se consideran las relaciones entre aguas superficiales y subterráneas y la influencia de la explotación de cada fuente de agua en la otra, tenemos que estar de acuerdo que el uso conjunto llega a ser un requerimiento obvio en las áreas con problemas de abastecimiento de agua. La gestión de las aguas subterráneas no puede existir sin la gestión de las superficiales y la gestión de las superficiales no puede hacerse de forma

óptima si no se incluyen los embalses subterráneos (16).

Las ventajas ofrecidas por el uso conjunto de los recursos hidráulicos no tiene por qué estar limitado a zonas áridas o a áreas con problemas agudos de escasez. El uso conjunto también proporciona ventajas económicas o soluciones más eficientes y económicas a los problemas de las áreas húmedas o con abundancia en recursos hídricos.

En los párrafos que siguen trataremos de describir las posibles aplicaciones del uso conjunto. Esta clasificación difiere de otras previas que tratan el uso conjunto de aguas de diversas fuentes usando criterios topológicos para enfatizar las relaciones entre las fuentes de agua y con los centros de consumo (17). Este enfoque está basado en el mismo acuífero, con énfasis especial en las funciones atribuidas usualmente a un sistema de recursos hidráulicos: fuente de agua, almacenamiento o regulación y tratamiento de agua.

No hemos analizado en este trabajo a los acuíferos como vehículo para el transporte de agua puesto que normalmente no son adecuados para cubrir esta función.

Los casos en los que los acuíferos sirven como medio de distribución de agua tampoco están incluidos explícitamente en este artículo pues esta función está relacionada íntimamente a su papel como medio de almacenamiento (18). Los acuíferos proporcionan una alternativa para la distribución de agua y ahorros sustanciales en los sistemas de distribución superficial.

UTILIZACION DE LOS ACUIFEROS COMO FUENTES DE AGUA

Además de los recursos explotables del acuífero, el agua que almacenan (llamada «reserva utilizable una sola vez») también puede utilizarse causando una sobreexplotación temporal.

La sobreexplotación incontrolada de las aguas subterráneas es uno de los problemas más serios a los que hay que hacer frente en la gestión de los recursos hidráulicos. En los Estados Unidos, el 25 por 100 del agua bombeada procede de la sobreexplotación de acuíferos (5) y

en las zonas más áridas de México, más del 50 por 100 del agua utilizada se obtiene de acuíferos que tienen muy poca recarga (19). En California la sobreexplotación alcanzó 5 Km³ por año en 1955. Debido al uso conjunto y a la recarga artificial esta cifra se redujo a valores entre 2,5 y 3,1 Km³ en 1982 (14). También existen problemas de sobreexplotación en algunas zonas del Mediterráneo español, en La Mancha y en las Islas Canarias.

A pesar de los serios problemas económicos y sociales que puede crear, la sobreexplotación no tiene por qué ser demostrada como regla general. De hecho la sobreexplotación de aguas subterráneas en California es una de las razones de su prosperidad que facilitó su desarrollo económico y subsiguientemente creó las condiciones propias para abordar otros proyectos más costosos como los trasvases desde cuencas con pluviometría alta en el norte del Estado (20).

La disponibilidad de grandes cantidades de agua en los acuíferos ha incitado a promover propuestas para la utilización correctamente planificada de las reservas como un medio para retrasar proyectos de construcción costosa. Esto se ha hecho en Israel, y se ha propuesto una metodología para modelar y optimizar económicamente las diversas secuencias (21).

UTILIZACION DE EMBALSES SUBTERRANEOS CON MOTIVO DE REGULACION

Hay diferentes maneras de explotar la enorme capacidad de almacenamiento de que suelen disponer los acuíferos. La recarga artificial es el concepto clásico que relaciona los acuíferos con zonas de almacenamiento. No obstante este procedimiento es muy caro y sus altos costes limitan su utilización extensiva. Los ejemplos clásicos de este tipo de utilización son los proyectos del Sur de California e Israel en los que los acuíferos son usados como elementos de almacenamiento terminal, o como elementos de almacenamiento lateral para trasvases intercuenas a la vez de servir como almacenamiento de aguas superficiales locales o aguas residuales tratadas.

Otra opción es la de utilizar más los embalses superficiales en los años o períodos lluviosos y aumentar el bombeo de los acuíferos en los secos. La capacidad de almacenamiento disponible se usa a través de las oscilaciones piezométricas. De esta manera se podrá disponer en el Valle Central de California de un volumen de almacenamiento subterráneo de 37.000 hm³ con oscilaciones relativamente pequeñas en contraste con los 27.000 hm³ proporcionados por el almacenamiento superficial (20). En España se han hecho propuestas similares en varias cuencas.

El análisis de sistemas río-acuífero ha demostrado que incluso en el caso de acuíferos aluviales estrechos, el impacto de los bombeos en los flujos superficiales pueden estar diferidos si los pozos se colocan a suficiente distancia de los ríos.

Identificando adecuadamente la localización de los pozos y programando los bombeos de acuerdo con la secuencia de las aportaciones superficiales puede aumentarse la disponibilidad de recursos. Los almacenamientos subterráneos que facilitan esta mejora se producen por las oscilaciones piezométricas inducidas.

Cuando el uso conjunto es contemplado de esta manera, no tiene ningún sentido la objeción de que el bombeo del agua subterránea reduce los caudales de los ríos.

Por último, la recarga inducida es otro proceso que puede aumentar el almacenamiento subterráneo de aguas superficiales. La explotación intensa de los acuíferos modifica de forma permanente o solo temporal el comportamiento hidráulico de los ríos permitiendo que el agua que se infiltre a través del lecho se almacene en el acuífero subyacente. Su aplicación a gran escala se ha propuesto para la cuenca del Ganges con el fin de tratar de almacenar parte del caudal del río principal y de sus afluentes utilizando la recarga inducida y la artificial por medio de canales sin revestir (22).

TRATAMIENTO Y MEJORA DE LA CALIDAD DE AGUA

En el curso del proceso de recarga artificial se transforman las características fisicoquímicas

y biológicas del agua a su paso por la zona no saturada y como resultado se reduce grandemente el contenido de bacterias, virus, materia orgánica y muchos compuestos tóxicos. Este método de tratar agua superficial contaminada se utiliza extensivamente en muchos países centro y norte-europeos. La recarga artificial también se ha utilizado para mezclar en el acuífero agua de diferentes características. También hay casos en los que se han recargado aguas residuales, aunque hasta ahora a pequeña escala.

Como ocurre con el agua superficial, el problema de la calidad y control de la contaminación es crucial para la explotación y gestión del agua subterránea. Se están realizando grandes esfuerzos en este área, que tienen que aumentarse en el futuro.

OTRAS POSIBILIDADES DE UTILIZACION DEL AGUA SUBTERRANEA

Durante las sequías se ha hecho un mayor uso del agua subterránea. Muchos países europeos aprovecharon esta posibilidad en el verano de 1976. En California esta táctica ayudó a paliar los efectos de la sequía en 1976-77.

Debido a la iniciativa privada, y en menor grado a acciones gubernamentales, se han mitigado en algunas áreas los efectos de la sequía que se produjo en España a partir de 1980. De hecho los efectos de la sequía fueron menores en las áreas con mayor tradición en la utilización de aguas subterráneas. Incluso se ha propuesto una metodología para proceder de forma sistemática en casos análogos (23).

El riego con aguas superficiales en zonas secas crea con frecuencia problemas de drenaje y salinización de suelos que pueden mitigarse con el bombeo de aguas subterráneas. El ejemplo más espectacular es el del sistema de riego del Punjab en la llanura aluvial del Indo en el Pakistan donde está emplazado el mayor sistema de regadíos del mundo que cubre 13 millones de hectáreas. La recarga del acuífero a través de los retornos del exceso de riesgos y la infiltración a lo largo de 65.000 Km de canales en su mayoría sin revestir ha producido problemas muy serios de salinización y drenaje. Se han tenido que abandonar unos dos millones de

hectáreas adicionales (24). Este caso se estudió con gran detalle y se hizo una propuesta para construir 30.000 pozos con capacidad suficiente para bombear 70.000 hm³ de aguas anualmente. Los objetivos de esta propuesta son rebajar la superficie piezométrica y eliminar parte del agua salada aliviando de esta forma los problemas de drenaje y salinización.

En el Asia Soviética Central se estima que anualmente se drenan 25.000 hm³ de agua a través de los sistemas de drenaje agrícola en las zonas de riego. Se ha propuesto la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas para utilizar estos recursos (25).

REALIZACIONES Y ESTUDIOS ESPAÑOLES

En España hay algunas realizaciones interesantes y se han realizado o se están iniciando estudios concretos por parte del Servicio Geológico de Obras Públicas que conjuntamente con la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de Valencia desarrolló una metodología original para el análisis del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.

Desde hace tiempo se practica el uso conjunto en el río Llobregat (26). En una primera etapa se hizo un uso intensivo de las aguas subterráneas. Posteriormente fue aumentando la participación de las aguas superficiales. Desde hace bastantes años se está utilizando la recarga artificial para mantener la recarga del río y recargando mediante pozos sobrantes de agua tratada para el abastecimiento a Barcelona.

En la Marina Baja está abastecida por un sistema complejo que consta de dos embalses Guadalest y Amadorio con aportaciones medias pequeñas 8,2 y 5,6 Hm³/año y muy variables; dos acuíferos, el de Beniarda y El Algar; una planta depuradora de aguas residuales que se reutilizan para riego y una red completa de canales y conducciones.

El manantial del El Algar drena el acuífero de su nombre. Tiene una aportación media de 25 Hm³/año con oscilaciones relativamente grandes. Sus caudales pueden tener alguna decena de metros cúbicos por segundo o bajar a menos de los 100 l/seg.

Para aprovechar parte de su caudal se construyó una central de bombeo, terminada en 1976, que bombea hasta 1.100 l/seg. de agua hasta el embalse de Guadalest con una conducción de 10 km y salto manométrico de 250 m.

El uso conjunto se inició con motivo de la sequía de 1978. Entre otras acciones se hizo la regulación del manantial mediante el bombeo de pozos colocados en sus inmediaciones que han permitido hacer frente a la sequía que continuó durante seis años más usando el agua almacenada por debajo de la cota de emergencia del manantial, con lo que el acuífero se ha utilizado como un auténtico embalse subterráneo.

La Planta de Castellón es una de las zonas del país en las que se han hecho estudios más completos de utilización conjunta. El sistema consta de tres embalses, Arenós y Siches en el río Mijares y María Cristina en Rambla de la Viuda. El acuífero se utiliza para el abastecimiento urbano y regar unas 13.000 hectáreas que se riegan exclusivamente con aguas subterráneas y 14.000 conjuntamente con aguas superficiales. Con aguas superficiales exclusivamente se riegan unas 13,00 hectáreas de riegos tradicionales.

También se han propuesto otros esquemas como el de la utilización conjunta para el abastecimiento de Madrid en el que interviene el acuífero del Terciario detrítico de la Fosa del Tajo con el sistema de presas y embalses del Canal de Isabel II, para el que se elaboró un modelo tridimensional del acuífero, y un modelo del sistema superficial. Su objetivo era el reducir o eliminar los déficits en épocas de estiaje (27).

Además se han estudiado o están iniciándose por el Servicio Geológico de Obras Públicas el estudio de las posibilidades de la utilización conjunta de muchos esquemas en todas las cuencas del país y no solo en las más secas. Entre las posibilidades de aplicar el uso conjunto en zonas húmedas está el abastecimiento de Santander que incluye la utilización durante estiajes de los acuíferos del Pas y de Camargo conjuntamente con los caudales de los ríos Pas y Pigüenza (28).

CONCLUSIONES

Aunque el agua subterránea ha sido olvidada muy frecuentemente por los planificadores puede ofrecer ventajas técnicas y económicas dignas de tenerse en cuenta. Los acuíferos pueden proporcionar recursos adicionales además de elementos de almacenamiento de agua, distribución y tratamiento que pueden combinarse ventajosamente con los recursos superficiales. Igualmente el agua subterránea puede proporcionar otras ventajas como las de su adaptabilidad al incremento progresivo de la demanda de aguas, la posibilidad de sobreexplotación temporal como medio de diferir la construcción de proyectos costosos, para mitigar los efectos de sequías y aliviar problemas de drenaje.

REFERENCIAS

- GERAGHTY, J. J.: *Are we really using ground water? Public Works*. (March) (1966) 86-87.
- AVIAS, I. V.: *Planification coordonnée des ressources en eaux superficielles et souterraines*. Importance des réutilisations de l'eau dans les pays arides et semiarides. Proceedings of 4th International Conference on Water Resources Planning and Management, Commission Européenne Méditerranée de Planification des Eaux, Marseille, France, May 1982, pp. 12-21.
- WIENER, A.: *The Role of Water in Development*, Mc Graw Hill. 1982.
- LLAMAS, M. R.: *Non economic motivation in groundwater use: hydroschizofrenia*, Groundwater, 13 (3) (1974) 196-300.
- VAN DER LEEDEN, F.: *Water Resources of the World*, Water Information Center, Port. Washington, New York, 1975.
- HOWELL, O. H. and WARMANM J. C.: *Groundwater management in the southeast*, Journal of the Water Resources Planning and Management Division. A.S.C.E., 8 (WR3) (October) (1982) 321-328.
- LOPEZ CAMACHO, B.; SAHUQUILLO, A. and SANCHEZ, A.: *Diez cuestiones básicas sobre las aguas subterráneas*. Boletín de Información del MO-PU, Madrid, España, No. 246, Junio 1978, pp. 5-10.
- WILLEKE, G. E.: *Social aspects of water resources planning*, Journal of the Water Resources Planning and Management Division A.S.C.E. 105 (WRJ) (March) (1979) 79-90.
- JAMES, L. D. and LEE, R. R.: *Economics of Water Resources Planning*, Mc Graw Hill 1971.
- ERCHARD-CASSEGRAINM, A. and MARGAT, J.: *Introduction à l'Economie Générale de l'Eau*. Masson, 1983.
- GORELIK, S. A.: *A review of distributed parameter groundwater management modeling methods*, Water Resources Research. 19(2) (April) (1982) 305-319.
- JAMES, D. L. and ROGERS, J. R.: *Economics and water resources planning in América*, Journal of the Water Resources Planning and Management Division. A.S.C.E., 105 (WR1) (March) (1979) 47-64.
- GOMEZ DE PABLOS, M.: *Ponencia I. Conferencia Nacional sobre Hidrología General y Aplicada, Salón Monográfico del Agua*. Zaragoza, España, 1974, pp. 45-55.
- State Water Resources Control Board and the Department of Water Resources, State of California, Policies and goals for California water management. The next 20 years, Joint Report, January 1982.
- DOWING, R. A.; DAKES, D. B.; WILKINSON, W. B. and WRIGHT, C. E.: *Regional development of groundwater resources in combination with surface water*. Journal of Hydrology 22 (1-2) (June) (1974) 155-177.
- FLOWER, L.: *Case study U.S.A. Santa Clara Valley District*, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, Operation of Complex Water Resource Systems, Erice, Italy. May 1981.
- YEVYEVICH, V.: *Conjunctive water use*, Water International, 4 (3) (September) (1979) 17-24.
- SAHUQUILLO, A.: *Panorámica mundial*. Tipología del uso conjunto. Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas, Universidad Politécnica de Valencia, Servicio Geológico de Obras Públicas, Madrid, España, 1983.
- Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Inventario Regional de Aguas Subterráneas, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, 1977.
- California State Department of Water Resources, The California Water Plan, Bull. No. 3, 1957.
- SCHWARZ, J.: *A System approach to the strategy of integrated management of surface and groundwater resources*, in H. I. Shuval (ed.), Water Quality management under Conditions of Scarcity. Israel as a Case Study, Academic Press, 1980.
- CHATUVEDY, M. C. and SRIVOSTAVA, V. K.: *Induced groundwater recharge in the Ganges basin*. Water Resources Research. 15 (5) (1979) 1156-1166.
- SAHUQUILLO, A.: *La utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas como paliativo de la sequía* Proceeding III Simposio Nacional de Hidrogeología. Madrid, España, Mayo 1983, pp. 253-270.
- CHAYDRY, A. T.; LABADIE, J. W.; HALL, W. A. and ABBERSTON, M. L.: *Optimal conjunctive use model for Indus Basin*, Journal of the Hydraulic Division A.S.C.E. 100 (HYS) (May) 66) 678.
- KATS, D. M.: *Combined Use of Ground and Surface Waters for Irrigation*. Soviet Hydrology, Selected Papers, American Geophysical Union, International Water Resources Association, American water Resources Association, 1975, pp. 190-194.
- CUSTODIO, E.; CACHO, F.; SUAREZ, M.; ISAMAT, F. J. y MIRALLES, J. M.: (1977), *Combined*

use of surface water and groundwater in Barcelona Metropolitan Area (Spain) Inter. Assoc. Hydrogeologist. Birmingham. Vol. XIII, pp. 14-27.

27. LOPEZ CAMACHO, B. y VARELA, M.: (1983), *El modelo de utilización conjunta de la provincia de Madrid.* En utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia.
28. SAHUQUILLO, A.: (1985), *Criterios actuales para la gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas.* R.O.P. Abril 1985, pp. 231-250.

Andrés Sahuquillo Herráez



Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la promoción de 1960. Trabajó en empresas privadas hasta 1963, año en el que ingresa en el Ministerio de Obras Públicas, desarrollando la mayor parte de su actividad en el Servicio Geológico de Obras Públicas, donde dirigió la Sección de Estudios Hidrogeológicos durante quince años. Ha participado activamente en

Simposios y Congresos nacionales e internacionales y es autor de numerosas publicaciones en revistas españolas y extranjeras. Ha sido profesor encargado de Curso de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense y en las Escuelas Técnicas Superiores de Ingenieros de Caminos de Madrid y Valencia, de la que es en la actualidad Catedrático de Geología Aplicada. Ha sido el Investigador Principal de proyectos de investigación cooperativa con las Universidades de Arizona, Colorado, Stanford y George Washington, y con el United States Geological Survey. Es presidente de la Asociación Española de Hidrología Subterránea.

