

Las aguas subterráneas en los abastecimientos

Un decenio de experiencias del Canal de Isabel II

.....

Bernardo López-Camacho y Camacho

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

José Antonio Iglesias Martín

Licenciado en Ciencias Geológicas

Canal de Isabel II

.....

RESUMEN

Se exponen las experiencias del Canal de Isabel II en el aprovechamiento de aguas subterráneas de la Comunidad de Madrid durante el último decenio. Se resumen los antecedentes históricos del abastecimiento de Madrid, las características principales de los acuíferos de la Comunidad, y la decisión del aprovechamiento de las aguas del subsuelo a principios de los años 90 dentro de las estrategias de respuesta frente a las sequías. Se concretan los objetivos planteados, los proyectos y la realización de las obras, las instalaciones disponibles, el control y seguimiento que se efectúa de las extracciones y de la evolución de los niveles piezométricos de los acuíferos, así como los costes resultantes de la explotación. Se exponen los resultados alcanzados, que en el último periodo de utilización (marzo 1999-abril 2000) han permitido aportar a las redes generales 71 hm³, que viene a suponer el 12% del total suministrado. La parte principal de las extracciones se lleva a cabo por medio de unos 50 pozos de 400-700 m de profundidad. Se avanzan unas líneas de actuación para el futuro.

ABSTRACT

The article describes the experience of the Canal de Isabel II in the exploitation of groundwater within the Madrid Community Area over the last decade. A summary is given of the historical background of the Madrid water supply, the main characteristics of the aquifers in the Community, and the decision to exploit subsoil waters at the beginning of the nineties as part of the contingencies taken in response to drought conditions. A description is given of the planned objectives, the design and execution of work, the available installations, the control and monitoring carried out during extraction and the development of the piezometric levels of the water bearing layers, as well as the resultant costs of exploitation. Details are given of the results obtained, and which over the last period of use (March 1999 - April 2000) enabled 71 hm³ of water to be supplied to the general network, which made up 12% of the total supplied. The majority of the extractions are taken from some 50 wells of 400 to 700m deep. The article concludes with a description of the plan of action for the future.

1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS: LOS "VIAJES DE AGUA"

Se entendería mal la historia de Madrid sin tener en cuenta el original e ingenioso sistema de proveerse de agua potable mediante su captación del subsuelo. Desde que en la segunda mitad del siglo IX Muhammad Ibn al Rahman fundase Madrid hasta que en 1858 se inauguró la traída de aguas del Lozoya por medio del Canal de Isabel II, la villa y corte estuvo abastecida por medio de una extensa red de galerías subterráneas de origen persa - los famosos qanat-, o "viajes de agua" en la terminología propia de los madrileños de los pasados siglos. Según el ilustre filólogo y arabista Oliver Asín (1958) el nombre de Madrid deriva del árabe Mayrit: lugar donde abundan los mayra, término árabe aún en uso: "conducción de agua", "arroyo madre" (1)

Madrid constituye uno de los lugares del mundo donde el desarrollo de la captación de aguas del subsuelo por medio de galerías alcanzó mayor esplendor. Baste decir, para tener una idea de la importancia de estas obras, que solo las galerías de los principales viajes superaban los 124 km de longitud. El archivo de la villa cuenta con más de 1.000 legajos en los que se recogen las diversas vicisitudes y circunstancias de su construcción, ampliación, reparación y aprovechamiento a lo largo de los siglos, restando aún numerosos vestigios de tales obras en el subsuelo de la capital. Al curioso lector lo remitimos a anteriores trabajos nuestros en los que se explana el tema (2 y 3).

La técnica de construcción consistía en abrir pozos hasta alcanzar la zona saturada (rara vez a profundidad mayor de 15 m), uniéndolos en dirección a la ciudad por medio de minas que también captaban agua y revistiéndolas o no según la consistencia del terreno (arcillas arenosas con capas de arena intercaladas). Los puntos de arranque de las minas se situaban distantes de la villa (hasta 12 km), con desniveles que equivalían a pendientes en torno al 1%. De trecho en trecho se construían depósitos subterráneos, "arcas" o "cambijas", para que las aguas reposasen o cambiasen de dirección. Las minas se prolongaban por debajo de la ciudad dividiéndose en ramales a los que se accedía desde las casas de los nobles, conventos o para el reparto al vecindario. De esto último se encargaba un ejército de aguadores que llegó a estar formado por hasta "800 y pico" repartidores a domicilio.

Desde el punto de vista de la eficacia de la captación de agua, los viajes eran poco más que arañazos en el nivel freático del acuífero. Cualquier período de sequía les afectaba grandemente, disminuyendo sus caudales y provocando malestar y alteraciones sociales en el vecindario. Con todo, los 70 km de galerías filtrantes existentes (el resto eran solo de conducción) proporcionaban un caudal de 20-30 l/s (una vez traducidos los "reales" fontaneros y "pajas" a las unidades actuales), lo que viene a equivaler a una infiltración anual en el área de captación (15 km²) de 40-60 mm. Cuando a mediados del siglo pa-



Madrid estuvo abastecida hasta mediados del siglo XIX por medio de una red de galerías subterráneas de origen árabe que llegaron a alcanzar 120 km de longitud. Bajo la ciudad existía un complejo sistema de arcas o cambijas (para el reposo y decantación del agua) y ramales de distribución.

sado la población de Madrid se acercaba a 250.000 almas, la dotación resultante en los años secos llegó a ser tan baja como de 4 litros por habitante y día. Benito Pérez Galdós, en sus Episodios Nacionales, (Narváez, 1849) recoge la angustia de nuestros antepasados por la sed y suciedad reinantes, y se hace eco del "fantástico" proyecto que tenía en la cabeza el entonces Presidente del Consejo D. Juan Bravo Murillo: "traer acá el Lozoya, sacándolo enterito de su lecho y derramándolo por nuestras calles, plazas, paseos y jardines. Oyeron esto los presentes como un cuento de hadas". (Pérez Galdós, op. cit.)

Los viajes de agua se fueron abandonando progresivamente desde 1858 y, con ellos, se fueron quedando en el olvido las aguas subterráneas. Se tardaría más de 100 años, hacia 1965, en retomar el tema.

SITUACION DE LOS CAMPOS DE POZOS DEL CANAL DE ISABEL II

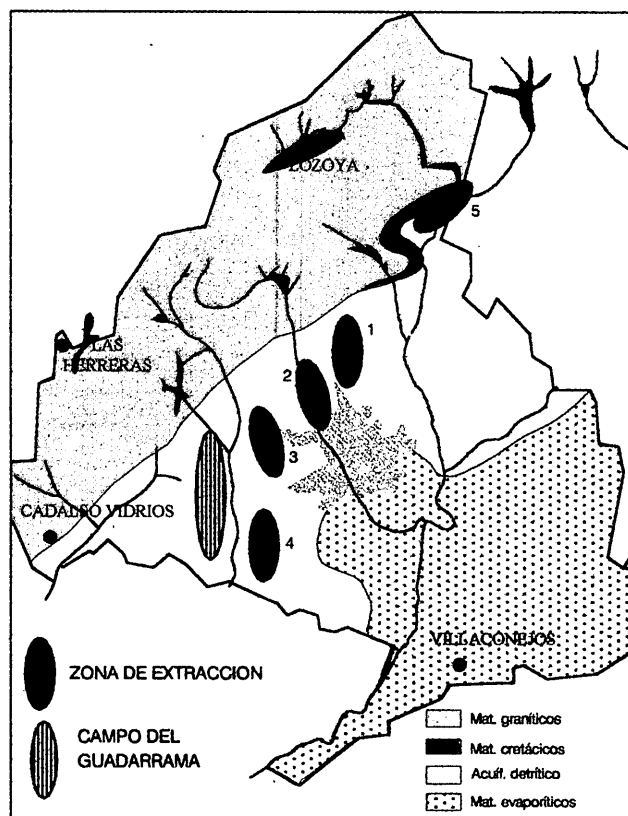


Figura 1.

2. LOS ACUÍFEROS EXISTENTES EN LA COMUNIDAD DE MADRID

Dentro de la Comunidad de Madrid se distinguen, en síntesis, los siguientes dominios hidrogeológicos (figura 1) (4 y 5):

2.1. Sustrato Granítico-Paleozoico

Se trata de un conjunto de materiales graníticos, gneísicos y paleozoicos que se extienden ocupando una amplia franja de dirección SO-NE en la parte norte de la Comunidad. A escala regional sus recursos subterráneos son irrelevantes, pudiendo prescindirse de ellos. Únicamente pueden ser utilizables para cubrir demandas muy pequeñas (del orden de 100 m³/día como máximo, en condiciones hidrogeológicas favorables y con problemas de persistencia de caudal en estiajes prolongados); la calidad del agua es buena y los posibles focos de contaminación (vertido de residuos sólidos o aguas residuales) se circunscriben a la proximidad de las áreas de captación. No obstante,

EXISTENTES

Denominación	Aportación anual (hm³)
1. Canal Alto y Bajo	21 - 24
2. Fuencarral	17 - 18
3. Zona Oeste	14 - 17
4. Batres - Móstoles	4 - 5
5. Torrelaguna	5 - 12
- Sistemas Locales	2 - 5
Total actual	63 - 81 hm³/año

PROYECTO

Campo del Guadarrama	30
Ampliación campos existentes	10 - 20
Total ampliación	40 - 50 hm³/año

OBJETIVO FUTURO

100 - 120 hm³/año

en áreas de urbanizaciones de la Sierra del Guadarrama, se han perforado en los últimos años de sequía cientos de sondeos a rotoperusión, generalmente para el riego de jardines y piscinas en viviendas unifamiliares. También se han utilizado las aguas subterráneas de estos materiales por el Canal de Isabel II para resolver el abastecimiento de poblaciones aisladas (caso de la pedanía de Las Herreras, en el término de Santa María de la Alameda, por medio de un moderno qanat) o para complementar el abastecimiento de Cadalso de los Vidrios; en este caso, se trata igualmente de un moderno qanat de 150 m longitud, que hace de galería filtrante en el arroyo de Las Tórtolas; el agua circulante se retiene mediante un pequeño azud y se extrae filtrada de la captación subterránea horizontal. Puede proporcionar hasta 400.000 metros cúbicos al año.

2.2. Calizas mesozoicas del borde de Somosierra

Dentro de la Comunidad ocupan una extensión muy reducida, restringiéndose a los alrededores de Torrelaguna y la fosa

del Lozoya. En el primer caso, su interés radica en la conexión del acuífero con el río Jarama, lo que asegura la reposición de los caudales que se extraigan. En la sequía de los años 92-93 se extrajeron del acuífero 21 hm³, por medio de la depresión de sus niveles y desconexión con el río, por el que no circuló agua durante varios meses; con las primeras lluvias el vaciado se rellenó en pocos días. Sin embargo se produjeron afecciones a la vegetación de ribera (alisos, fresnos, sauces) debidos a los descensos de los freáticos. En los siguientes periodos de sequía la utilización de este acuífero ha sido mucho menor con el fin de no producir efectos ambientales (6). En el período marzo 1999-abril 2000, sólo se han extraído 6,8 hm³ de pozos alejados del río, cesando el aprovechamiento cuando disminuían los caudales circulantes.

El retazo cretácico de la fosa del Lozoya se encuentra presumiblemente bien alimentado por su conexión con el río Lozoya y el embalse de Pinilla. Se ha utilizado para resolver problemas locales (abastecimiento de Rascafría y captaciones de garantía para Pinilla y Lozoya, principalmente).

Las aguas de estos acuíferos son potables, aunque pueden aparecer problemas de dureza y sulfatos como consecuencia de la presencia de materiales yesíferos suprayacentes.

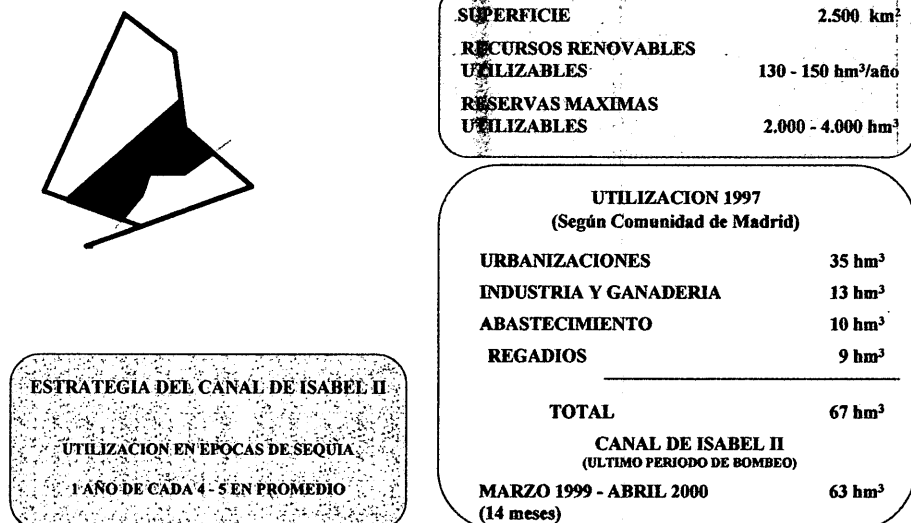
2.3. Terciario Detrítico

Alberga el acuífero más importante de la Comunidad. Su extensión rebasa los 2.500 km² (incluyendo en esta cifra los materiales que se encuentran bajo los depósitos cuaternarios), estando constituidos por niveles de arenas y arenas arcillosas englobadas en una matriz arcillosa. Su espesor total es de centenares de m; el aprovechable puede alcanzar hasta 700 m, apareciendo aguas bastante mineralizadas por debajo de esta última profundidad (7).

Se han llevado a cabo numerosos estudios con el objetivo de cuantificar las cifras de la recarga o recursos hídricos subterráneos renovables, incluso varios modelos digitales de flujo por distintas instituciones y organismos (8 y 9); el último por ahora ha sido realizado en 1997 por el Canal de Isabel II, con vistas al aprovechamiento del acuífero en periodos de sequía (10). Como conclusión, en la figura 2, se recogen las principales cifras resultantes. En los apartados que siguen nos referiremos casi exclusivamente a este acuífero.

Las últimas estimaciones de la infiltración o recarga media anual se cifran en unos 130-150 hm³/año. El volumen de reser-

Figura 2.



vas o agua movilizable se estima en unos 2.000-4.000 hm³ (resulta curioso señalar que después de detallados y fatigosos estudios, incluso con complejos modelos digitales de flujo, las cifras de infiltración resultan del mismo orden que la calculada para los históricos "viajes de agua" que se citaron en apartados anteriores.) La circulación del agua en el interior del acuífero se produce a partir de la infiltración de las precipitaciones en los interfluvios. Desde las áreas más elevadas, el agua circula en profundidad según el esquema general del modelo de Hubber y Toth, con gradientes descendentes que pueden llegar a valores del 20-40% (es decir, entre perforaciones próximas de diferente profundidad pueden producirse diferencias de nivel de 50 m o, incluso, superiores). Por el contrario, en las zonas de valle se producen flujos de descarga ascendentes, de manera que en algunos casos se pueden producir surgencias.

Hidrodinámicamente el acuífero funciona como un conjunto único, heterogéneo y anisótropo (relación entre permeabilidades horizontales y verticales del orden de 100 o superior). La permeabilidad media del conjunto es muy baja: del orden de 0,25 m/día. Ello se traduce en transmisividades generalmente comprendidas entre 40-400 m²/día y caudales específicos del orden de 0,2-1,5 l/s por metro de depresión de la lámina de agua en el interior de los pozos. El coeficiente de almacenamiento generalmente se encuentra comprendido entre 0,1 y 1 por mil en bombeos de larga duración; es decir, el acuífero se comporta de forma confinada. En síntesis: podemos decir que se trate de un acuitardo de gran espesor más que de un acuífero en sentido estricto. De cara a su aprovechamiento estas características se traducen en unas consecuencias de tipo práctico: a) tienen mayor importancia las técnicas constructivas de la captación que la localización



Pozo construido en el área recreativa de Batres (Madrid) respetando cuidadosamente el entorno. El área protegida constituye un buen perímetro de protección de la captación.

de áreas de algo mejores o peores características hidrogeológicas; b) necesidad de construir pozos profundos (400-700 m) y provocar fuertes descensos (100 a 250 m) para obtener caudales de interés; c) afecciones considerables entre pozos distantes 1-3 km en los bombeos de larga duración, con disminución del caudal extraído con el tiempo. De este acuífero se extrajeron 63 hm³ por el Canal de Isabel II en la última campaña de bombeo (marzo 1999-abril 2000).

2.4. Terrenos Evaporíticos

Se incluyen en este grupo tanto los materiales paleógenos que afloran en los alrededores de Torrelaguna adosados a las calizas cretácicas (no representados en la figura 1 por el nulo interés de su aprovechamiento) como los materiales miocenos en facies evaporítica del SE de la Comunidad. Se trata de terrenos poco permeables, con agua im potable por su elevado contenido en sales disueltas.

Coronan estos últimos materiales, tablas de calizas del páramo en ambas márgenes del Tajuña, con extensiones de 450 km² al norte y 150 km² al sur (mesa de Chinchón). Pueden atender pequeñas demandas del orden de pocos litros por segundo, aunque presentan problemas de persistencia de los caudales por falta de continuidad lateral de los materiales permeables (los pozos funcionan como si vaciasen depósitos, agotándose en cortos periodos y con sólo recuperaciones parciales). La calidad de sus aguas oscila entre aceptable o mala si se afecta a los materiales margoyesíferos subyacentes. Han permitido soluciones puente de abastecimiento en muchas poblaciones de la zona hasta la llegada de las redes generales con agua de mejor calidad y mayor garantía.

2.5. Materiales Cuaternarios

Se extienden por los valles de los ríos principales de la Comunidad, con espesores en general inferiores a 10 m, si se exceptúa el Jarama aguas abajo de Madrid, donde pueden alcanzar los 40 m, y el Tajo, en su límite sur de la Comunidad, en cuyo aluvial pueden encontrarse espesores de hasta 30 m (caso de Villacañeros, que se ha utilizado por el Canal como solución puente, con volúmenes extraídos del orden de 600.000 m³/año).

Presentan en general una deficiente calidad química, pudiendo presentar problemas bacteriológicos si no se elige adecuadamente la ubicación de las captaciones para abastecimiento.

En razón al escaso espesor de los materiales aluviales y a los problemas de calidad, no presentan en principio interés para el abastecimiento fuera de las soluciones puente o de emergencia a las que nos hemos referido antes.

2.6. Comentario sobre las evaluaciones de recursos y reservas

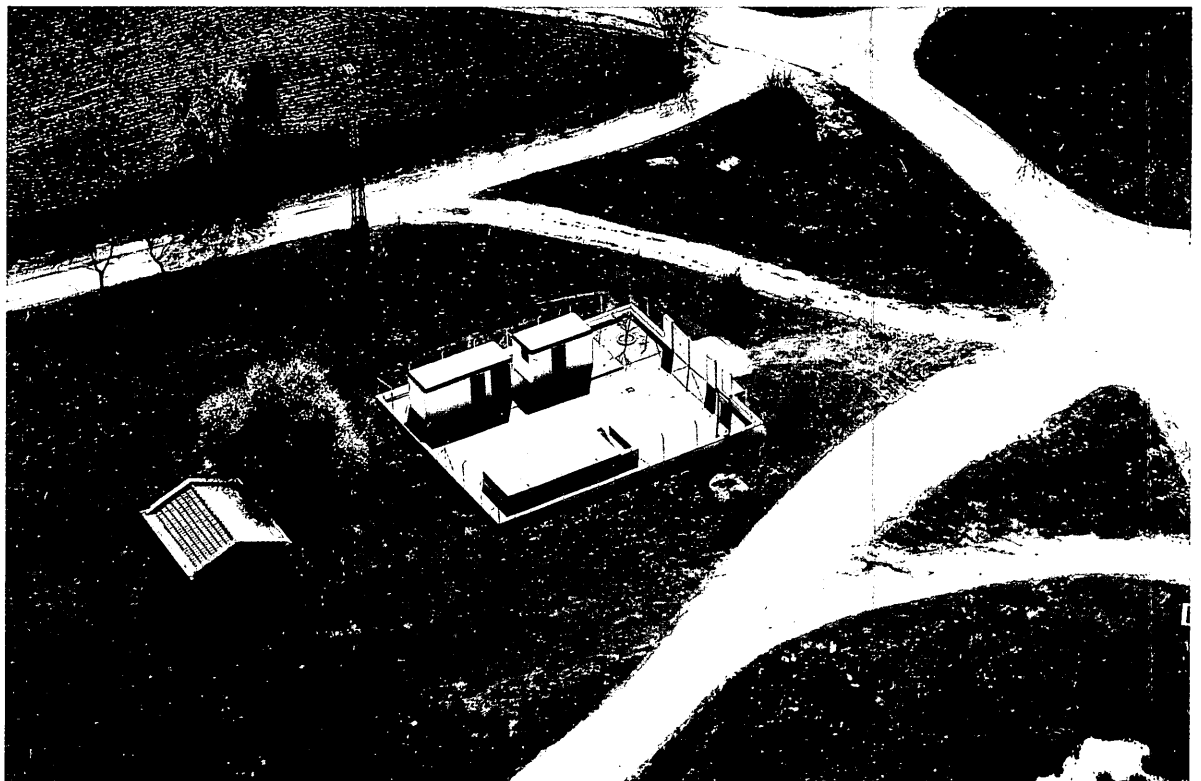
Ha sido frecuente en los últimos documentos de planificación hidrológica presentar cifras de los recursos y reservas de los diferentes acuíferos o unidades hidrogeológicas. A efectos de cuadrar los balances hidráulicos y conocer los recursos hídricos superficiales y subterráneos de cuencas y subcuencas (y la relación entre ellos) resulta obligado. Sin embargo, dichas cifras pueden interpretarse también de manera incorrecta, asimilándolas a recursos extraíbles mediante pozos. Como quiera que para este aprovechamiento se necesitan otras condiciones (como estructuras de acumulación, buenas conexiones hidrodinámicas, etc), hemos preferido dar sólo cifras cuando éstas tienen sentido de cara a un posible aprovechamiento por medio de captaciones. Otro caso se reduciría a hacer (o repetir) un ejercicio académico que corresponde a épocas pasadas en las que no se habían aceptado aún los conceptos de los aprovechamientos racionales y sostenibles o sostenidos.

3. LA UTILIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

3.1. Las actuaciones en el período 1970-1990

Desde la llegada de las aguas del río Lozoya a Madrid (1858) hasta los años 60 del siglo que ahora termina, los viajes

Parcela del pozo CB-14, al norte de Madrid, junto a una almenara del Canal Bajo (1858) a la que incorpora los volúmenes extraídos. Dentro del área vallada (zona de protección inmediata) puede verse la arqueta semienterrada de cabeza del pozo (de 507 m de profundidad), caseta de transformador (400 kVA) y caseta de cuadros de maniobra y control. La captación proporcionó 2,2 hm³ en el último año de sequía (Paisajes Españoles).



de agua fueron entrando en desuso, agravados por la contaminación de sus aguas al ir creciendo la ciudad sobre sus trazados, lo que daba lugar a frecuentes epidemias por el uso de sus aguas.

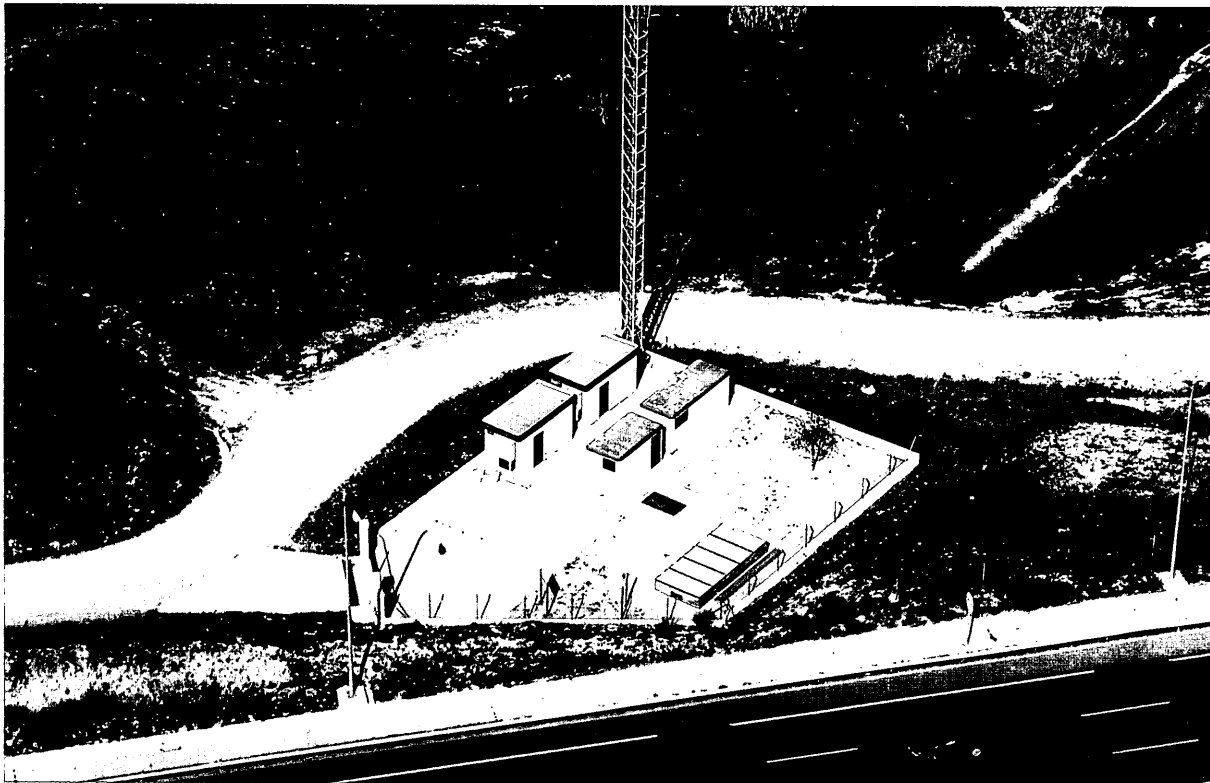
Los intentos de perforación de pozos profundos para captar aguas subterráneas siguiendo el modelo de la cuenca artesiana de París se saldaron con fracasos. Incluso las perforaciones y estudios que se llevaron a cabo en la sequía de 1965, que dio origen a las últimas restricciones en el abastecimiento de la capital, no concluyeron en ningún aprovechamiento efectivo de cara al abastecimiento regional.

Hasta 1970 aproximadamente no se comenzó a disponer de las tecnologías para perforar pozos profundos (del orden de 200 o más metros de profundidad) adecuados a las difíciles características hidrogeológicas del principal acuífero de la Comunidad que, como queda dicho, es el constituido por los sedimentos arcillo-arenosos de edad terciaria. Incluso en dicha fecha (1970) era rara la perforación que alcanzaba caudales sostenidos de 20 l/s. No obstante, se comenzaron a construir numerosos pozos en el alfoz de Madrid para el suministro de ciudades satélites de fuerte crecimiento (caso de Móstoles, Fuenlabrada y Parla, por ejemplo), urbanizaciones e industrias, todas ellas sin conexión con las redes generales del abastecimiento. Ante el fuerte crecimiento experimentado en las décadas 60-70, estos abastecimientos entraron con frecuencia en crisis, originando fuertes tensiones sociales e, incluso, políticas (11).

A principios de los años 70 comenzó también a plantearse el aprovechamiento de las aguas subterráneas por el Canal de Isabel II. En aquellas fechas, el Canal era un organismo autónomo dependiente del Ministerio de Obras Públicas. La estrategia inicial fue que las empresas privadas financiaran y construyesen (a su riesgo y ventura) los pozos y las instalaciones necesarias para la incorporación del agua a la red general del abastecimiento. El Canal, mediante el correspondiente contrato, pagaba un precio por m³ entregado en sus instalaciones, con independencia de la situación hidrológica existente.

Con arreglo a esta estrategia se construyó el campo de pozos de Fuencarral (con tecnología alemana) que entró en servicio en 1975 y, posteriormente, los campos de pozos de Valde-lamasa y el Plantío (con escaso éxito) y el de Torrelaguna, en un acuífero distinto: el de las calizas cretácicas próximas al tramo medio del río Jarama. Por su parte, la Diputación Provincial de Madrid, a través de la Fundación Sur de Agua Potable, puso en marcha el campo de pozos de Batres (1978) junto al río Guadarrama cuando éste se encuentra próximo a abandonar el territorio de la Comunidad, desde el que se suministraba un conjunto de núcleos urbanos entre Griñón y San Martín de la Vega. La máxima aportación del conjunto de los campos de pozos no pasó de los 20 hm³/año.

Desde 1984, con el Canal ya dependiendo de la Comunidad de Madrid, se sigue una nueva estrategia, pasando el Canal a gestionar directamente el aprovechamiento de las aguas subterráneas con criterios más racionales. Se trataba de evitar los



La expansión de infraestructuras en las proximidades de Madrid produce concentración de instalaciones. Primero se construyó el pozo CB-15 sobre la traza del Canal Bajo (arriba a la derecha). El pozo aportó 2,4 hm³ en el último año de sequía. Después se construyó la autovía M-40 en sus proximidades. Por último, dentro de la parcela se instalaron la torre y casetas de telefonía móvil (Paisajes Españoles).

bombes en época de aguas abundantes en los embalses superficiales, con el consiguiente ahorro energético, reservando los acuíferos para épocas de sequías o escaseces, con lo que se conseguía, además, un uso sostenible y más eficiente de los mismos. Dentro de esta nueva estrategia el Canal adquirió los campos de pozos antes descritos entre 1984 y 1986.

Asimismo, durante los años 80 el Canal extendió sus redes generales abasteciendo a municipios que presentaban problemas de suministro (caso de Móstoles, Fuenlabrada y Parla entre otros), haciéndose cargo de los pozos de abastecimiento de dichos municipios.

3.2. Nueva estrategia: el uso de las aguas subterráneas como respuesta frente a las sequías

Desde 1990 el Canal lleva a cabo un programa de construcción de nuevos campos de pozos, así como de rehabilitación y reposición de las antiguas captaciones, de acuerdo con la nueva estrategia. También lleva a cabo estudios y modelos matemáticos para profundizar en el comportamiento de los acuíferos (12).

La construcción de los nuevos campos de pozos se basó en una filosofía muy sencilla: comenzar por lo más fácil. Evidentemente lo más fácil era perforar los pozos en las proximidades de las instalaciones ya existentes (grandes aducciones y depósitos), con lo que se evitaban los trámites de adquisición de terrenos y accesos y se facilitaba el trazado de las líneas de

energía eléctrica de alimentación al discurrir (subterráneas) por las bandas de servicio de las grandes arterias.

Merced a las instalaciones de las que se va disponiendo, durante las sequías de los años 90 se incorporan a las redes de abastecimiento los siguientes volúmenes de aguas subterráneas:

Años 1992-93	18 meses	81,1 hm ³
Año 1995	11 meses	49,3 hm ³
Marzo 1999-abril 2000	14 meses	71,0 hm ³

En la actualidad el Canal dispone de 54 pozos en los sistemas generales, de profundidades que por lo general alcanzan los 400-500 m, llegando en algunos casos a los 700 m. También dispone de 68 pozos en, los sistemas locales, si bien la mayor parte de estas unidades sólo tienen como misión servir de garantía como fuente de suministro alternativo en caso de avería de la conducción general, por lo que su utilización es muy reducida a los efectos de volúmenes aportados (figura 1).

La puesta en marcha de las instalaciones de aguas subterráneas se efectúa según lo establecido en el Manual de Gestión de Sequía del Canal de Isabel II, que utiliza como herramienta para la toma de decisiones el CANSYS, un modelo de gestión que objetiva las decisiones de utilización de las diferentes fuentes de suministro del Canal en función del agua almacenada en los embalses con unos criterios de garantía preestablecidos (13).

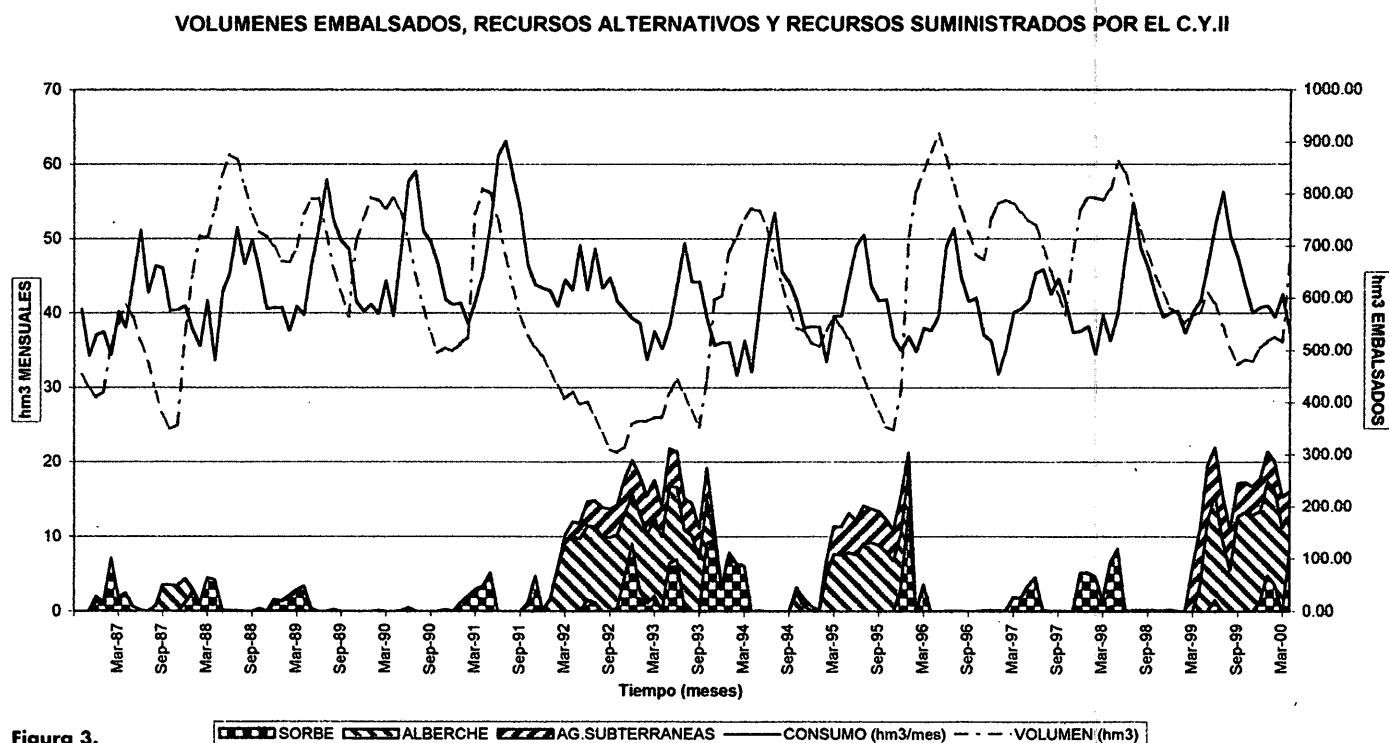


Figura 3.

En la figura 3 se recogen los resultados de la aplicación del modelo de gestión en los últimos años. Se han representado tanto el volumen almacenado en los embalses del abastecimiento como los consumos mensuales. En los periodos con aguas abundantes en los embalses superficiales (14 embalses con una capacidad total de almacenamiento de 946 hm³), se cubre la totalidad de la demanda con las aguas superficiales. En épocas de escaseces, cuando descienden los volúmenes almacenados en los embalses, entran en servicio los "recursos alternativos" constituidos por: a) derivaciones por gravedad de las aguas fluyentes del río Sorbe, que tienen mayor importancia el final de los periodos de sequía, es decir, cuando comienzan a fluir los ríos; b) bombes del río Alberche, con elevaciones del orden de 300 m, que constituyen el principal recurso alternativo; c) bombeo de aguas subterráneas, con elevaciones medias del orden de 250 m. Cuando entran en funcionamiento las aportaciones de recursos alternativos se descarga a los embalses de cubrir una parte muy importante del consumo, como se puede apreciar en la figura 3.

No obstante conviene señalar que el aprovechamiento del acuífero terciario detrítico no se efectúa sólo por el Canal de Isabel II. Al contrario, son muy numerosas las perforaciones aprovechadas por los particulares. En un reciente estudio de la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid: "Medidas protectoras y correctoras para el acuífero detrítico de Madrid", de julio de 1998 (14), se evaluaba en 67 hm³ las extracciones llevadas a cabo por los particulares en 1997. En

la figura 2 se recoge la desagregación por sectores (urbanizaciones, industrias, poblaciones y regadíos)

En esas circunstancias, la suma de extracciones de los particulares (de carácter permanente) con los que lleva a cabo el Canal en el último año (63 hm³) se aproximan a los recursos medios renovables del acuífero. Pero no es este el caso; como queda dicho, la estrategia del Canal es utilizar exclusivamente las aguas subterráneas en periodos de sequía, que se estiman en 1 año de cada 4 ó 5 en promedio. Con ello se asegura que las cifras de extracciones totales se alejan de las estimadas para la recarga media, garantizando la sostenibilidad del acuífero y la compatibilidad de los aprovechamientos preexistentes. El volante regulador constituido por las reservas del acuífero (2.000-4.000 hm³) son suficientes para cubrir los desequilibrios entre los periodos de extracciones/recarga superiores a periodos anuales.

La calidad de las aguas del acuífero detrítico es, en general, buena o muy buena. Son aguas de baja mineralización (su residuo seco no alcanza los 200 mg/l frente a 1.500 de límite máximo de la normativa vigente), de baja dureza (en general inferiores e, incluso, bastante inferiores a 10 grados franceses) y exentas de gérmenes patógenos. Las aguas del acuífero calizo de Torrelaguna (que son tratadas en planta, como las aguas superficiales) son algo más duras, aunque lejos de los parámetros de las aguas de abastecimiento de las principales ciudades de la fachada mediterránea (no alcanzan en general, en su conjunto, los 30 grados franceses, aunque este hecho

origina protestas de unos ciudadanos acostumbrados a aguas superficiales de calidad excelente) (15).

4. LAS INSTALACIONES DE CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

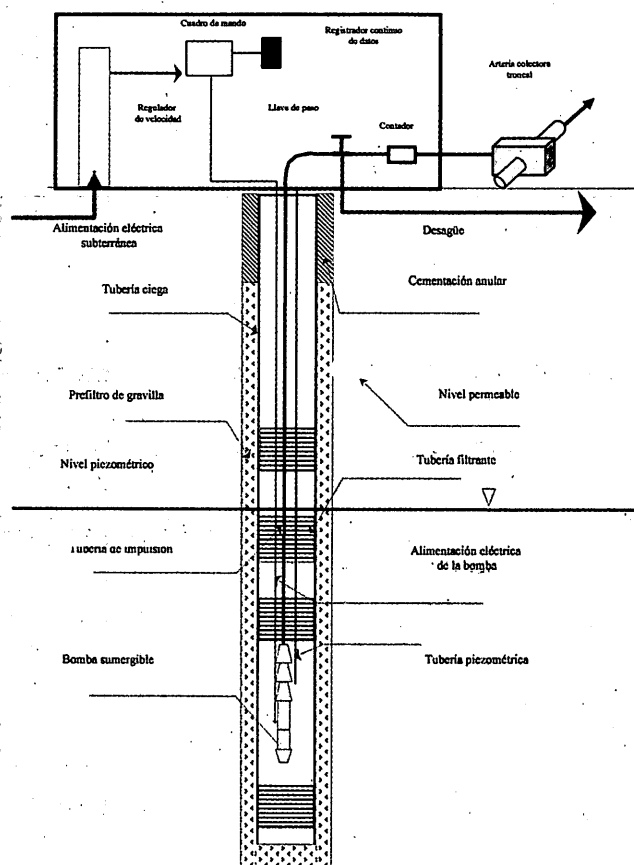
4.1. Proyectos de construcción de pozos

En primer lugar, se ha prestado gran atención a la tecnología de construcción de pozos en el acuífero detrítico, incorporando las mejoras e innovaciones que proporciona el mercado. De acuerdo con la experiencia previa de dos décadas de perforación de pozos en los terrenos del acuífero detrítico se ha apostado por el método de rotación con circulación inversa, utilizando lodos naturales, vigilando estrechamente con laboratorios a pié de pozo sus características: densidad, viscosidad, espesor de "cake" filtrado y contenido en arenas. Se llevan a cabo todo tipo de testificaciones geofísicas en los sondeos (potencial espontáneo, resistividad corta y larga, radioactividad natural, verticalidad y alineación, salinidad, temperatura y gradiente, etc). Se utiliza tubería electrosoldada de acero al carbono de 400 a 500 mm de diámetro y 8-10 mm de espesor de chapa, con prefiltro de gravilla silíceica clasificada de 3-5 mm. Se han utilizado filtros de puentecillo o de ranura continua, con 1,5 mm de paso. Los pozos no llevan ningún tipo de reducción en los 500 primeros metros. Si la profundidad es superior, a partir de los 500 m el diámetro de entubación se reduce a 250 mm. Se desarrollan con aire comprimido (a veces con el método de cierre del pozo y presiones/descargas; en ocasiones con obturadores por tramos) completados por el desarrollo con bomba, en ocasiones aislando distintos tramos del pozo. Los aforos sobrepasan las 72 horas. A veces se han analizado las aportaciones de los distintos filtros por medio de flow-meter. Se procede a un registro final con vídeo observando el estado de las soldaduras y la limpieza de los filtros.

Las innovaciones y mejoras en la tecnología de perforación de pozos en este tipo de terrenos (impulsadas por las realizaciones del Canal) han permitido obtener caudales de aforo que en el 80% de los casos se sitúan entre 80 y 120 l/s, llegando a superar en algún caso los 150 l/s. Los caudales de proyecto para el equipamiento se reducen en un 25% en relación con los del aforo, con objeto de tener en cuenta los descensos en explotaciones prolongadas y otras posibles afecciones.

4.2. Proyectos de equipamiento

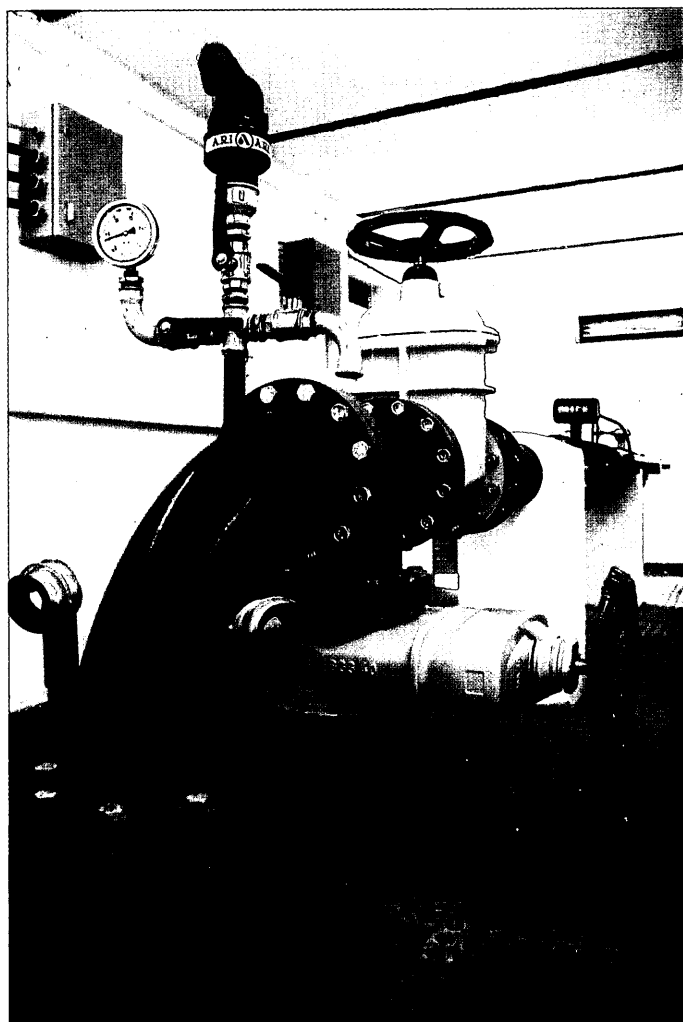
Una vez concluida la fase anterior y de acuerdo con sus resultados, se redacta el proyecto de equipamiento que incluye obra civil, equipos electromecánicos, transformadores y cuadros de maniobra y control, líneas eléctricas de alimentación y conducción de conexión a los puntos de entrega.



Esquema constructivo de pozo de 400-700 m de profundidad provisto de cementación anular de protección de cabeza (hasta 25-30 m de profundidad), prefiltro de gravilla y filtros (por debajo de 80-100 m de profundidad). La bomba de 400-900 CV se sitúa a profundidades de 250-300 m. El equipamiento dispone de regulador de velocidad, automatismo programable, medidores de niveles (automático y manual), desagüe al terreno, caudalímetro, y transductor para el registro de caudales y niveles.

El Canal ha desarrollado y ha ido mejorando una tecnología propia de equipamientos con elementos tipificados, como pueden ser: parcela de protección vallada de 300-400 m²; caseta semienterrada de cabeza de pozo con objeto de facilitar posteriores operaciones de extracción de la columna de impulsión; caseta prefabricada de transformador y caseta independiente de cuadros de maniobra y control. Debe tenerse en cuenta que la potencia de las bombas que se instalan en los pozos del Canal oscilan en general entre los 200 y 400 kW llegando en algún caso a los 660 kW (900 CV). En consecuencia, los demás elementos del proyecto están en correspondencia con estas potencias.

Los pozos tienen instalados dos pequeños tubos piezométricos para medida de niveles del agua (automáticos y manuales), protección térmica del motor de la bomba sumergida (se



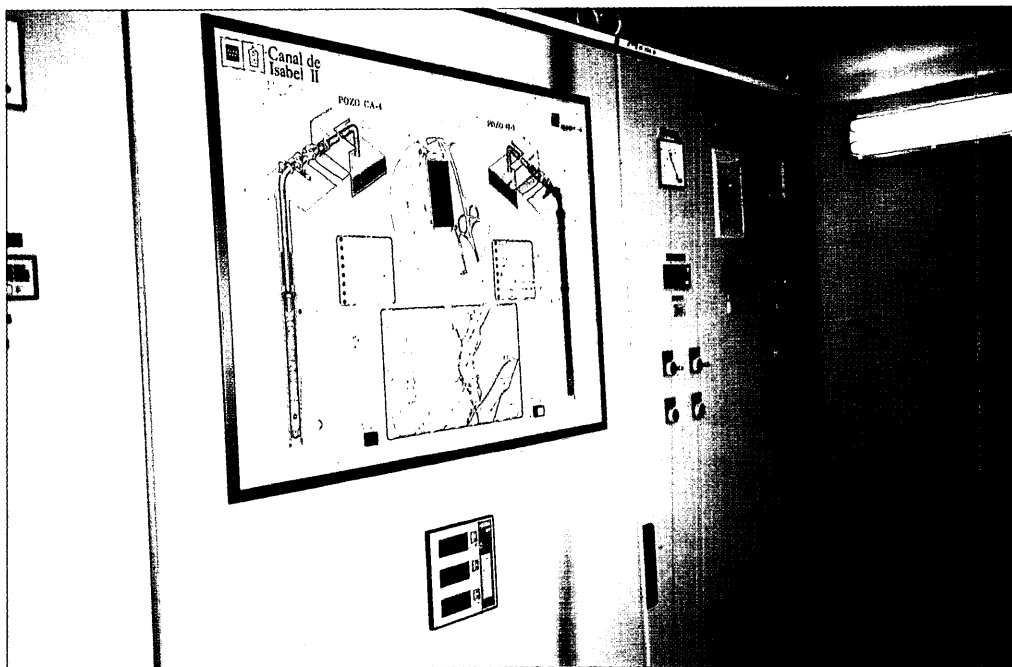
Cabeza de pozo provisto de dos tubos piezométricos, ventosa, manómetro, grifo toma muestras y derivación para desagüe.

instalan a 300 y hasta 400 m de profundidad), grifo tomamuestras y caudalímetro electromagnético. Disponen de un desagüe independiente para limpieza y comprobación de la calidad ya que la mayor parte de los pozos se incorporan aguas abajo de las ETAP.

Las instalaciones van provistas de autómatas programables y permiten comprobar todo tipo de parámetros eléctricos y de maniobras. También cuentan con condensadores para corrección de la energía reactiva. Se está procediendo en la mayor parte de las unidades a instalar protecciones catódicas monitorizadas, que están proporcionando excelentes resultados (tras varios años de funcionamiento las tuberías de impulsión que se extraen permanecen, a efectos de corrosión, sin muestra alguna de haberse iniciado el fenómeno). En los pozos más importantes se ha comenzado a instalar variadores de frecuencia, con lo que es posible programar cualquier estrategia de explotación (por ejemplo mantener niveles constantes dejando variar el caudal) interesante para funcionamientos en períodos cortos y largos y prevención de posibles empeoramientos en la calidad del agua. Cuando es necesario cuentan con transmisión por radio a centros de concentración, desde donde se pueden manejar por telemando. En estas fechas (julio 2000) se está comenzando a instalar la transmisión automática de datos al Centro Principal de Control del Canal de Isabel II con objeto de disponer de información en tiempo real y telemandar los arranques y paradas de los pozos.

4.3. Control y seguimiento

En todos los pozos, además de las lecturas periódicas de caudales, volúmenes producidos, niveles, consumo energético,



Cuadro de control provisto de autómata programable, control de redes eléctricas (tensiones, intensidades y energía reactiva), control hidráulico (caudales y niveles), temperatura del motor y horas de funcionamiento.

ACUIFERO DETRITICO TERCIARIO DE MADRID

EVOLUCION EN EL PERIODO 1994 - 2000

Producción (hm3/mes) , Profundidad del agua (m), Media de 40 pozos

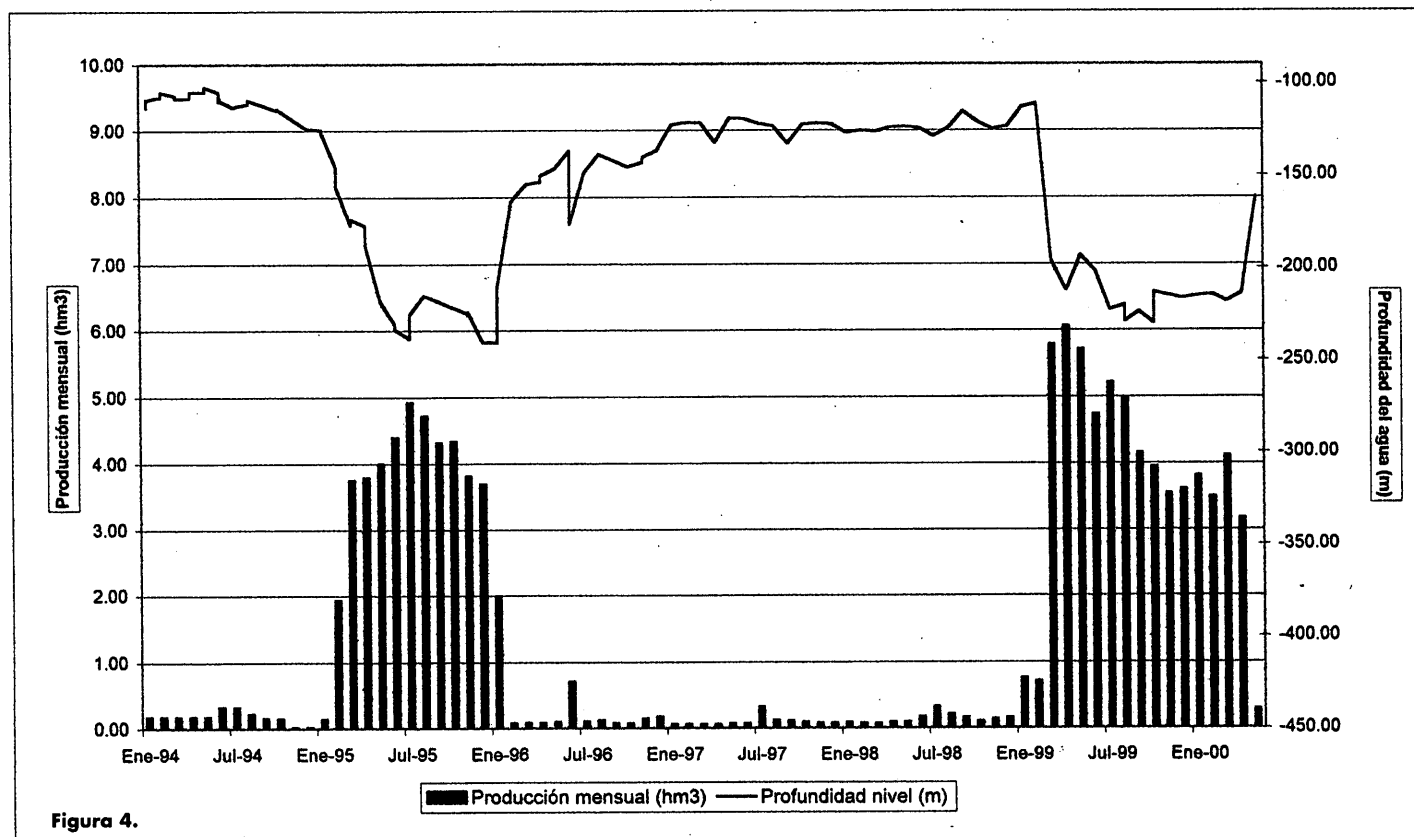


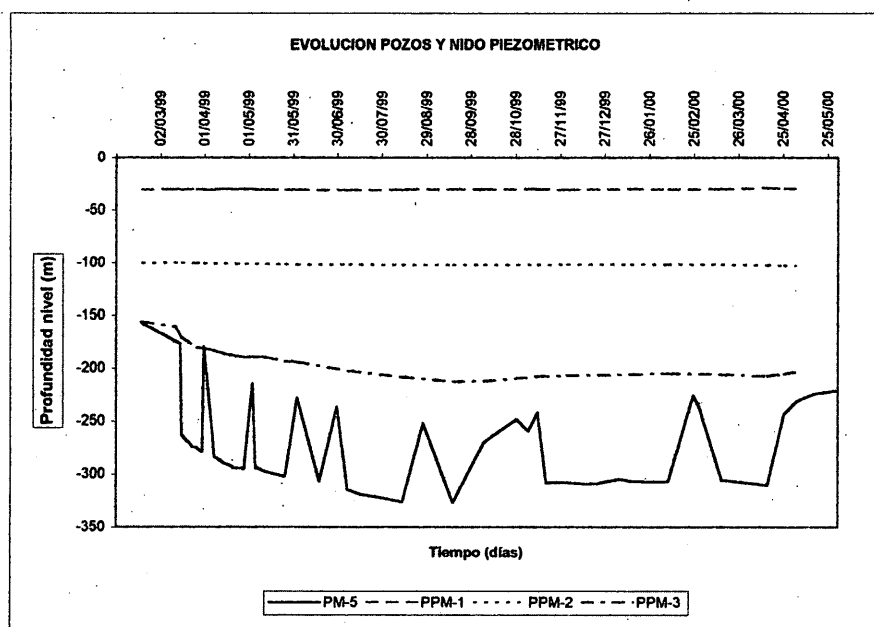
Figura 4.

etc, recogidos dentro de los registros correspondientes del sistema de aseguramiento de la calidad que rige en el Canal de Isabel II, se lleva a cabo un control automático de los principales datos por medio de data-logger o transductores. En total se dispone en estas fechas de 42 estaciones automáticas de registro de datos. Los parámetros medidos son principalmente nivel y caudal; en ocasiones se registran presiones de tuberías horizontales y parámetros de calidad de algún depósito de regulación de los volúmenes extraídos. Todos estos datos se incorporan a la base de datos informatizada. Como ejemplo de resultados en la figura 4 se presenta la evolución de extracciones y niveles medios de un conjunto de 40 pozos del acuífero detrítico que presentan una idea muy clara del descenso y recuperación de niveles en los ciclos de bombeo/recuperación y permiten traducir a datos sencillos la idea de sostenibilidad del acuífero.

Además del control en los pozos de extracción, el Canal dispone de 21 piezómetros que permiten conocer el comporta-

miento del acuífero en zonas algo más alejadas de los campos de pozos. También van provistos de captadores automáticos de datos. Entre los piezómetros se cuenta con 3 nidos de 3 piezómetros cada uno de ellos, ranurados a distintas profundidades: entre 25 y 35 m los piezómetros cortos, entre 120 y 140 m los intermedios y entre 250 y 290 m los profundos. Entre otros objetivos los nidos de piezómetros permiten un control ambiental de la explotación. La estrategia de los pozos del Canal, situados en los interfluvios generalmente, es aprovechar los acuíferos situados a más de 80-100 m de profundidad. Se trata de evitar la captación del agua de los primeros metros del terreno a fin de no afectar a la humedad aprovechada por la vegetación y a los manantiales y rezumes que se originan a favor de los pequeños acuíferos someros. Igualmente se trata de evitar afecciones a los pozos de poca profundidad. La verificación de que esas condiciones se cumplen la ofrecen los nidos de piezómetros. Así, los cortos no reflejan ningún efecto de las extracciones en los pozos profundos próximos, presentando nive-

EFECTOS DEL BOMBEO DE UN POZO SOBRE LOS NIVELES DEL ACUIFERO A DISTINTAS PROFUNDIDADES



CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS			
POZO	PROF. (m)	PROF. 1er. FIL. (m)	LONG. FILT. (m)
PM-5	477	132.5	89
PIEZOM.	PROF. (m)	ZONA FILTR. (m)	DIST. A POZO (m)
PPM-1	40	25-35	200
PPM-2	150	120-140	200
PPM-3	300	270-294	200

Figura 5.

les muy altos (del orden de los 15-30 m de profundidad), mantenidos durante los períodos de extracción y desconectados de los niveles aprovechados más profundos. Por el contrario, los piezómetros más profundos de los nidos reflejan fielmente las extracciones, con descensos del orden del 10-30% de las de los pozos de bombeo a distancias de 1.500 ó 300 m respectivamente. Los piezómetros del nido de profundidad intermedia (ranurados entre 120-140 m de profundidad) muestran, como podría esperarse, una situación intermedia entre las anteriores. En la figura 5 se presenta un ejemplo de lo que acabamos de describir.

El proceso de control y seguimiento se completa para las captaciones con un programa de revisiones periódicas de equipos, instalaciones y calidad del agua, así como evaluaciones en las distintas campañas de bombeo del rendimiento de los pozos (medido a través del caudal proporcionado por el pozo por metro de depresión de la lámina de agua en su interior); todo ello programado y estandarizado de acuerdo con las normas internas con que se ha dotado al Canal dentro del sistema de aseguramiento de calidad (17).

5. RESULTADOS OBTENIDOS

5.1. Producción

El Canal cuenta en la actualidad con una capacidad de bombeo apta para poder proporcionar en un año de sequía 60-70 hm³, lo que viene a representar del orden del 12% de la

demanda de los casi 5 millones de habitantes abastecidos. Dicho de otra forma: la capacidad para abastecer durante un año a una ciudad de unos 600.000-700.000 habitantes, aunque como queda expuesto su estrategia es otra: la de proporcionar volúmenes en períodos de sequía.

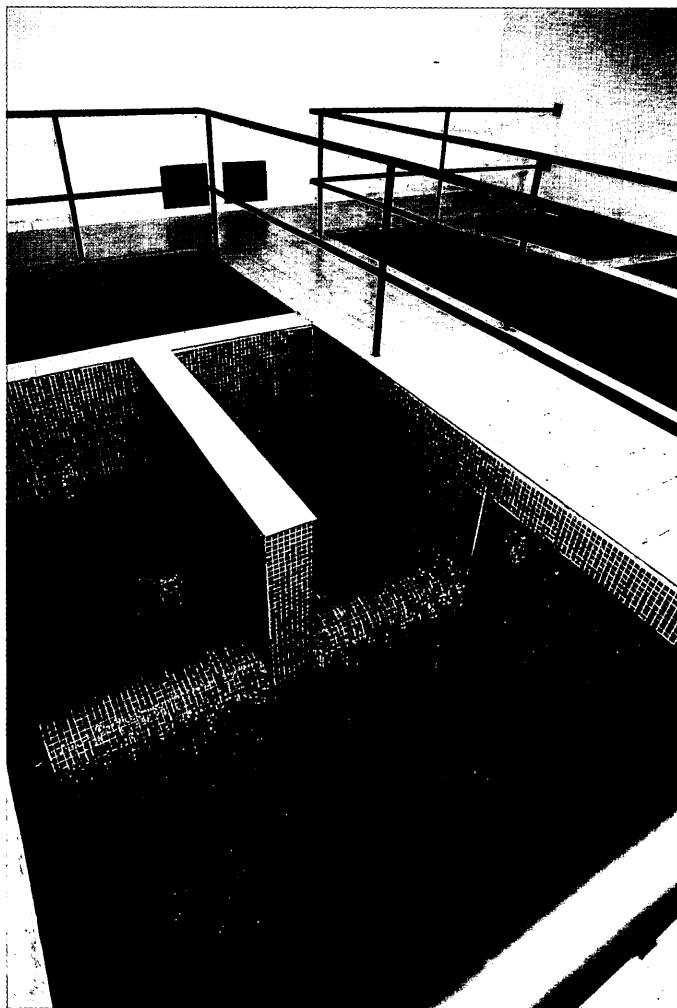
Los campos de pozos con que cuenta el Canal se agrupan, a efectos de su gestión, en los que se denominan sistemas generales y sistemas locales. Los primeros aportan volúmenes a las grandes arterias y depósitos de la red general del abastecimiento. Excepto los volúmenes captados del acuífero calcáreo de Torrelaguna, que son tratados en la ETAP de El Bodonal, el resto de los pozos de los sistemas generales se incorporan a las aducciones aguas abajo de las ETAP. Ello exige un cuidadoso seguimiento de su calidad, con arranques por desagüe hasta que se verifican los parámetros de potabilidad. La cloración se efectúa por mezcla con los volúmenes procedentes de las plantas de tratamiento.

Los sistemas locales están integrados por pozos que aportan sus aguas a depósitos de la población, estando limitadas sus producciones por las necesidades de las demandas que atienden. Excepto en casos de poblaciones importantes o no conectadas aún al sistema general del abastecimiento, se tratan de pozos para emergencias, sin uso habitual. Debido a las necesidades de control de su funcionamiento y al mantenimiento de la desinfección, lo que exige controles diarios de personal, y el bajo volumen que, en general, se demanda, no resulta rentable ni operativo hacer funcionar la mayor parte de estos pozos durante los períodos de sequía.

En esas condiciones, los 71 hm³ aportados durante el último año de sequía (marzo 1999-abril 2000) proceden en su mayor parte de los sistemas generales (93%). Por acuíferos, la mayor parte ha sido extraída del terciario detrítico (88 %), seguido de las calizas de Torrelaguna (6,8 hm³ en el año, equivalentes al 10% del total) y completados con otros acuíferos en los sistemas locales (1,2 hm³). Debe destacarse que mientras en la sequía de los años 92-93, del acuífero calcáreo de Torrelaguna conectado al río Jarama, se extrajeron 21 hm³ en un período de 18 meses, en el último año esta cantidad se ha reducido sustancialmente al limitarse las extracciones a los meses en los que los flujos circulantes por el río eran de relativa magnitud, a fin de evitar cualquier posible afección a la vegetación de ribera.

Además de lo anterior, la práctica de la integración de las aguas subterráneas en una red compleja, como es la del abastecimiento a la Comunidad de Madrid, presenta numerosos problemas que se van apareciendo en el día a día. Así por ejemplo, las maniobras de mantenimiento de canales y depósitos (mantenimiento, limpieza, obras de mejora o acondicionamiento, etc) obligan a parar los pozos que aportan las aguas a dichas instalaciones durante algunos períodos de tiempo. Asimismo, cuando existan conducciones horizontales en los campos de pozos, o de conexión de éstos con la red general, también aparecen roturas (muchas veces debidas a obsolescencias de dichas conducciones o a que los anteriores propietarios utilizaron materiales de no muy alta calidad que se hace necesario reponer).

Cuestión aparte es el tema de averías en las propias captaciones y equipos. Es frecuente que los campos de pozos adquiridos por el Canal, procedentes de empresas privadas o ayuntamientos, tengan 25, 30 o más años de antigüedad. En



Cámara de concentración de un campo de nueve pozos en Fuencarral. El agua está exenta de turbidez y gérmenes patógenos y presenta una excelente calidad química (conductividades de 400 microsiemens y dureza inferior a 10 grados franceses). Sólo precisa cloración para el uso humano (Canal de Isabel II).

Sala de control del campo de pozos de Fuencarral, constituido por 9 unidades de 500 a 700 m de profundidad, con una capacidad de bombeo de 600 l/s. En el último año de sequía proporcionó 17,5 hm³. Provisto de telecontrol, telemando, captación automática de datos, nido de piezómetros y pluviómetro. (Canal de Isabel II).

esas condiciones la construcción de nuevas captaciones de sustitución con técnicas modernas y de mayor eficiencia, y la reposición total de equipos y cuadros eléctricos (con frecuencia fuera de normativa) resulta obligado, lo que conduce a prolongados períodos fuera de servicio mientras se va reconstruyendo el correspondiente campo de pozos.

Asimismo es frecuente que las bombas alcancen en un par de campañas de bombeo cerca de las 20.000 horas de funcionamiento (en períodos de sequía suelen funcionar ininterrumpidamente), lo que supera los límites fijados por los fabricantes para la revisión de bobinados y rodetes.

También se producen averías durante el funcionamiento, como resulta lógico para cualquier profesional que tenga cometidos en áreas de producción. Se hace necesario analizar las causas de estas averías e introducir las modificaciones necesarias en los equipos y su régimen de funcionamiento. Entre las averías aparecidas pueden señalarse el desequilibrio entre tensiones de las diferentes fases de la alimentación eléctrica (al situar las bombas a 300 m de profundidad es necesario efectuar un buen diseño de la colocación de los cables para evitar desequilibrios por inducciones), subida de temperatura en los motores de las bombas sumergidas que debilitan el aislamiento de los bobinados (causados por descenso relativo de las aportaciones de los filtros situados por debajo de la bomba), aparición de posibles vibraciones por excesivo ajuste entre las bridas de las tuberías de impulsión y el entubado del pozo, que provocan el desgaste de cojinetes, etc). Es decir, un conjunto de problemas de orden práctico que van proporcionando un cuerpo de "expertise" a los técnicos responsables de su gestión. Así, en explotaciones del tipo que estamos tratando, parece necesario contar con un parque de electrobombas que permitan la sustitución rápida de las averías eliminando los tiempos que transcurren entre la extracción del equipo, su reparación y su nueva instalación que, en ocasiones, es muy dilatado.

5.2. Inversiones y costes

Las inversiones del Canal en perforaciones, equipamientos de pozos e instalaciones de aguas subterráneas en el último cuatrienio han sido de unos 2.000 Mpta. A mediados de los 90, la inversión efectuada para disponer de una capacidad de 1 l/s resultaba ser del orden de 1 millón de pesetas. A medida que se han ido efectuando los pozos más fáciles en cuanto a su ubicación, características y posibilidades de conexión en la red general, lógicamente la inversión ha ido subiendo, aunque sin sobrepasar el módulo de 1,5 Mpta por l/s de capacidad.

En esas condiciones, el coste resultante de la amortización de las instalaciones (incluyendo tasas de descuento) sobre el metro cúbico, suponiendo una vida útil de la captación de 25 años y un año de funcionamiento de cada cuatro, con factores de utilización adecuados a la experiencia habida, resulta ser inferior a 10 pta/m³ (18 y 19). Aún suponiendo un 20% en concepto de averías y reposición de los elementos más delicados (por

ejemplo, electrobomba y cuadros de control), el coste resultante no pasa de 12 pta/m³.

En cuanto a gastos de energía, en el período marzo 1999-abril 2000, la factura de energía imputable a la producción de los 71 hm³ asciende a unos 800 Mpta. Aunque en dicha partida se incluyen términos de potencia de instalaciones de garantía sin uso o de uso esporádico, la repercusión de la energía por metro cúbico resulta ser de unas 11 pta/m³. El consumo medio por metro cúbico viene a ser de 1,1-1,2 kWh/m³ (es decir, elevaciones medias del orden de 250 m, incluyendo la elevación hasta boca del pozo y, en algún caso, el rebombeo hasta depósitos). Debe tenerse en cuenta que las instalaciones van provistas de condensadores para corregir los términos reactivos y se dispone de contadores de discriminación horaria.

En resumen: el coste resultante para el m³ se sitúa en unas 20-25 pta, sin incluir costes de personal y gastos generales. Debe tenerse en cuenta que se trata de costes de garantía, comparables con otros de características análogas para cubrir períodos de sequía, y no se trata, en absoluto, de suministros de base de los abastecimientos, encomendados en el caso del Canal de Isabel II a las aguas superficiales reguladas en embalses.

6. LÍNEAS FUTURAS DE ACTUACIÓN

Como queda expuesto, en el último decenio el Canal ha ido desarrollando instalaciones de captación de aguas subterráneas e integrándolas entre sus fuentes de suministro para épocas de sequía.

Las actuaciones se han desarrollado principalmente sobre un acuífero considerado "difícil", de baja permeabilidad (los hidrogeólogos lo tenían rebajado a la categoría menor de "acuitardo"), con numerosos fracasos en los intentos de su explotación y, sin embargo, con grandes expectativas de tipo teórico o académico que, durante décadas, no se traducían en actuaciones concretas de resultados prácticos (con algunas notables excepciones como los campos de pozos de Fuencarral, o de Batres, de iniciativas privadas). En cambio han proliferado estudios teóricos de todo tipo, algunos bien fundados y sensatos, pero otros desenfocados y lindando con los tradicionales "arbitrismos".

Durante la última década, a impulsos de las sequías que han ido apareciendo, se han ido implantando las captaciones y conectándolas con las redes de una manera programada y prudente. Cuando aparece un período de sequía, los responsables del abastecimiento demandan (como resulta lógico) producción, pudiendo parecer insuficientes los volúmenes alcanzados. Por el contrario, los técnicos encargados del servicio siempre anhelan terminar enseguida las captaciones en fase de construcción o equipamiento (con el fin de aumentar la producción) y reparar enseguida las inevitables averías que se producen. Pero el paso torpe de la realidad (con sus dilaciones inexorables, las demoras en reparaciones, las contingencias de la ges-

ción de redes complejas que producen retrasos, los condicionantes de tipo ambiental,...) acaba imponiendo su ritmo fatigoso.

Siempre queda el propósito de enmienda de tener las cosas listas para la siguiente sequía, mejorando lo mejorable, poniendo en servicio lo que está en vías de realización y realizando nuevos proyectos de ampliación de la capacidad productiva.

De cara al próximo cuatrienio (2000-2003) se prevén las siguientes actuaciones principales:

▼ Continuación del programa de ampliación de la capacidad productiva, reposición de captaciones, mantenimiento y rehabilitación de pozos e instalaciones, con el objetivo de obtener un incremento adicional de 10-20 hm³/año. Estos programas suponen una inversión de unos 600 Mpta/año.

▼ Proyecto de construcción de un nuevo campo de pozos en la cuenca del Guadarrama (fuera de los límites del Parque Natural y, obviamente, compatible con su conservación) con el objetivo de obtener 30 hm³ en un año de sequía, dejando recuperar el acuífero durante 3-4 años (figura 1). La inversión estimada inicialmente (incluida conexión con el sistema general del abastecimiento) es de unos 6.800 Mpta. En junio de 2000 se ha efectuado la preceptiva Declaración de Impacto Ambiental, con informe favorable. El proyecto comprende la construcción de unos 26 pozos de profundidades de 400-700 m. Hasta la fecha se han construido 7 pozos de investigación que han proporcionado en aforo un total de 700 l/s.

Con estas operaciones, se pretende alcanzar un objetivo final de disponer de 100-120 hm³ en un año de sequía (del orden del 20% de las necesidades). Para ello será necesario contar con una capacidad de bombeo de 6 m³/s y una potencia eléctrica instalada de 25.000 kW.

Por último queremos dejar reseñada una experiencia innovadora puesta en marcha últimamente (julio 2000): la recarga artificial del acuífero detrítico terciario con agua potable por medio de un pozo de bombeo situado al norte de Madrid. La idea vuelve a ser sencilla: aprovechar la proximidad de los pozos a las grandes aducciones del sistema general del abastecimiento para, en épocas de agua abundante en los embalses superficiales, introducir agua (previamente tratada en planta) en los pozos favoreciendo la recuperación del acuífero. Para ello se ha hecho un diseño "ad hoc", que permite la limpieza periódica de los filtros del pozo por medio de bombeo a desagüe. El pozo se ha elegido en un área hidrogeológicamente estratégica, rodeado de otros pozos de extracción que, en la recarga artificial, funcionan como piezómetros de observación. Además se ha construido un nido de tres piezómetros a distintas profundidades, para efectuar el seguimiento de la experiencia, contándose con registradores automáticos de datos en todos los puntos de control. Se cuenta con estudios favorables de compatibilidad química entre el agua de recarga, el agua del acuífero y el medio. Se aprovecha la ventaja de que los niveles del agua en el área de recarga son profundos (niveles estáticos del orden de 120-150 m de profundidad) con lo que se

cuenta con una considerable carga hidráulica para la entrada del agua en las capas permeables. Los primeros resultados son notables; pero sus consecuencias, caso de ser positivas, y las posibilidades que pueda abrir esta experiencia son materia a tratar otro día.

7. REFLEXIONES FINALES

En apartados anteriores se ha pretendido resumir las experiencias del Canal de Isabel II en relación con el aprovechamiento de las aguas subterráneas. En aras de la concisión, hemos hecho gracia de las cuestiones relativas a la investigación del acuífero: estudios geológicos y geofísicos (7), hidrogeológicos (4 y 5), de datación isotópica del agua subterránea (20), de aprovechamiento del acuífero (8), modelos de flujo (6 y 9), simulaciones de escenarios (10), estudios de calidad y contaminación (15), estudios de evaluación de impacto ambiental (21 y 22), análisis de vulnerabilidad de los acuíferos frente a contaminaciones potenciales, modelos de contaminación, estudios de perímetros de protección (23), estudios hidrogeoquímicos, etc. Todo ello se viene realizando desde hace 20 años, con numerosas publicaciones y trabajos tanto de las administraciones públicas como de universidades, y existe una nutrida biblioteca de los más variados estudios. En la bibliografía se resumen los principales estudios realizados por el Canal de Isabel II en relación con estos temas durante la última década.

Análogamente hemos evitado deliberadamente todas las cuestiones relacionadas con la administración pública del agua: temas de autorizaciones, concesiones, gestión, planificación, etc, que merecería, al menos, otro trabajo de extensión no menor que el presente.

Lo que hemos considerado novedoso es adelantar unos primeros resultados de la experiencia real en el aprovechamiento de aguas subterráneas en la región de Madrid, los criterios seguidos, las tecnologías empleadas, las vicisitudes surgidas y las líneas de mejora. En ello nos hemos centrado. Sólo nos queda, pues, concluir.

8. CONCLUSIONES

Las aguas subterráneas de los alrededores de Madrid, que prestaron servicio de abastecimiento a los madrileños hasta mediados del pasado siglo, han resurgido como fuente de abastecimiento, primero moderadamente de la mano de la iniciativa privada a partir de la década de los años 70 y, después, por iniciativa del Canal de Isabel II desde 1990.

Dentro de la estrategia de su utilización exclusivamente limitada a periodos de sequía con carácter de garantía de suministro, en el último año han proporcionado 71 hm³ equivalente al 12% del volumen total del abastecimiento.

De cara al futuro, con las realizaciones en ejecución y los proyectos en marcha, se espera alcanzar una capacidad de sumi-

nistro de 100-120 hm³ en los años de sequía (un año de cada 4-5 en promedio), lo que requerirá la instalación de una capacidad de bombeo de 6 m³/s y una potencia eléctrica de 25.000 kW, con el objeto de tener en cuenta las distintas contingencias que se producen en la integración de las instalaciones de aguas subterráneas en la red general de un abastecimiento complejo como el de la Comunidad de Madrid.

Al tratarse de instalaciones con el objetivo de garantizar el suministro en periodos de sequía, con exigencias de puntas relativamente elevadas y largos periodos de reposo, los costes resultantes vienen a ser de 20-25 pta/m³, incluyendo amortización de las inversiones y los gastos energéticos, pero sin considerar costes de personal y generales.

La integración de las aguas subterráneas en los sistemas de abastecimiento presentan una variada gama de cuestiones que, al ir las abordando de forma práctica, constituyen una auténtica "expertise", acerca de la cual sería bueno ir intercambiando información, resultados y criterios. Tal variado abanico de cuestiones comienzan por la hidrogeología y técnicas de captación, continúan por los equipos electromecánicos, siguen por los instrumentos electrónicos de control y manejo, se prolongan en la informática del manejo y análisis de la información y concluyen en los procedimientos de aseguramiento de calidad. Todo este corpus constituye hoy los quehaceres modernos de esta actividad.

AGRADECIMIENTOS

Las actuaciones que se han reseñado en las páginas anteriores -quizá con brevedad excesiva- han contado en todo momento con el respaldo y apoyo de la dirección del Canal de Isabel II. Primero, al inicio del programa de construcción de nuevos campos de pozos y rehabilitación de los existentes, con una decidida apuesta por el tema por el entonces Director Gerente del Canal D. Roque Gistau Gistau; posteriormente, por medio de sucesivos impulsos para su creciente desarrollo; en todo momento, por su interés en la integración de las aguas subterráneas en el sistema general del abastecimiento, para lo que se ha contado -además- con una amplia colaboración de los distintos servicios del Canal.

En la parte técnica se ha contado con un reducido pero eficaz equipo de profesionales: al frente de ellos han estado Emilio Cabrera Méndez, en el proyecto y construcción de las captaciones y elaboración de estudios hidrogeológicos y Antonio Muñoz García, en el proyecto y ejecución de equipamientos e instalaciones y en la explotación de las mismas. Con todos ellos se comparte el día a día y han colaborado generosamente en la elaboración del presente trabajo. ■

BIBLIOGRAFÍA

- (1) - Oliver Asín, J. (1958): "Historia del nombre de Madrid" Instituto Miguel Asín. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- (2) - López-Camacho, B., Bascones, M. y De Bustamante, I. (1986): "El agua subterránea en Madrid" Boletín nº 46 del Servicio Geológico. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- (3) - López-Camacho, B., Bascones, M. y De Bustamante, I. (1986): "Antecedentes del Canal de Isabel II: Viajes de agua y proyectos de canales". Canal de Isabel II.
- (4) - Aguiló, M., coordinador (1983): "El agua en Madrid". Diputación de Madrid.
- (5) - López Vera, F. (1985): "Las aguas subterráneas de la Comunidad de Madrid". Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Comunidad de Madrid. PIAM, nº 7.
- (6) - Canal de Isabel II y Universidad Complutense Madrid (1994): "Modelo digital de flujo subterráneo del acuífero cretácico de los alrededores de Torrelaguna" Informe de difusión limitada.
- (7) - Canal de Isabel II y Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid (1994): "Conocimiento Geológico del Subsuelo Productivo de la Cuenca Miocena de Madrid". Informe de difusión limitada.
- (8) - López-Camacho, B., y Varela, M. (1988): "Utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas en la provincia de Madrid". Boletín del Servicio Geológico nº 48, marzo 1988.
- (9) - Dirección General de Obras Hidráulicas (1996): "Estudio 2/96 sobre evaluación de usos de agua subterránea y realización de un

- modelo de flujo del acuífero detrítico de Madrid". Subdirección General del Servicio Geológico. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- (10) - Canal de Isabel II (1997): "Desarrollo de un modelo de flujo del acuífero detrítico explotado por el Canal de Isabel II". Informe de difusión limitada.
- (11) - López-Camacho, B. (1986): "Explotación de aguas subterráneas en la Comunidad de Madrid". En "Jornadas sobre la explotación de aguas subterráneas en la Comunidad de Madrid", Canal de Isabel II. PIAM, nº 12.
- (12) - López-Camacho, B. (1995): "Las aguas subterráneas en los abastecimientos españoles. El aprovechamiento en la Comunidad de Madrid". Revista de Obras Públicas nº 3345, julio-agosto 1995.
- (13) - Canal de Isabel II (1999): "Manual de Gestión de sequías". Última actualización de 1 de marzo de 1999.
- (14) - Dirección General de Calidad Ambiental (1998): "Medidas Protectoras y Correctoras para el Acuífero Detrítico de Madrid". Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Regional de la Comunidad de Madrid.
- (15) - Canal de Isabel II e Instituto Tecnológico Geominero de España (1997): "Caracterización de la calidad y riesgo de la contaminación de las aguas subterráneas en la zona de influencia del Canal de Isabel II".
- (16) - López-Camacho, B. y Cabrera, E. (1993): "Investigación de aguas subterráneas en el acuífero detrítico de Madrid". Tecnoambiente nº 32, octubre 1993.

- (17) - Muñoz, A. (1999): "El aseguramiento de calidad en la explotación de aguas subterráneas". En "Las aguas subterráneas en los abastecimientos españoles", Instituto Tecnológico Geominero de España y Club del Agua Subterránea.
- (18) - López-Camacho, B. (1974): "Análisis económicos de las posibilidades de las aguas subterráneas de las proximidades de Madrid". Revista de Obras Públicas, octubre.
- (19) - López-Camacho, B. (1982): "Aspectos económicos del aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas en la provincia de Madrid". El Agua en la Región. Monografía de la Diputación de Madrid.
- (20) - Canal de Isabel II y Universidad Autónoma de Madrid (1994): "Variaciones del contenido en isótopos ambientales del acuífero terciario detrítico de Madrid". Informe de difusión limitada.
- (21) - Canal de Isabel II (1995): "Estudio de impacto ambiental de los pozos de explotación de aguas subterráneas del Canal de Isabel II". Informe de difusión limitada.
- (22) - Canal de Isabel II (1999): "Estudio de impacto ambiental de las aguas subterráneas. Cuenca del río Guadarrama (Madrid)". Informe de difusión limitada.
- (23) - Canal de Isabel II (1996): "Estudio de perímetros de protección de los pozos de abastecimiento de aguas subterráneas de los sistemas generales del Canal de Isabel II". Informe de difusión limitada.