

# LA CONTRIBUCIÓN DE LOS AVANCES CIENTÍFICOS A LA SOLUCIÓN DE LAS CRISIS DEL AGUA

M. RAMÓN LLAMAS MADURGA \*

\* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. C/ Valverde, 22. 28004 Madrid

## RESUMEN

Casi todas las regiones áridas y semiáridas tienen hoy día algún tipo de conflictos sociales o políticos relacionados con los recursos hídricos. Por lo general, estos conflictos o crisis hídricas se deben más a problemas de mala gestión del recurso que a su escasez física.

Los avances científicos y tecnológicos conseguidos en los últimos decenios permiten eliminar o al menos mitigar estos conflictos. En este trabajo se presentan cinco tipos de avances recientes que tienen relación con los problemas hídricos. Estos cinco avances son:

- 1) La invención y popularización de la bomba de turbina o bomba sumergible que ha permitido un aumento espectacular en el uso del agua subterránea para el regadío dando lugar a la denominada “revolución silenciosa del uso intensivo de las aguas subterráneas”.
- 2) Los progresivos avances en la ingeniería química en la tecnología de membranas han permitido obtener agua de mar desalada a un precio que oscila entre 0,5 y 1,0 €/m<sup>3</sup>. Esto va a permitir resolver los problemas de escasez en muchos núcleos urbanos costeros.
- 3) El comercio del “agua virtual” está cambiando los conceptos de seguridad alimentaria y/o hídrica de un país. Esto ha sido posible gracias a las mejoras en el abaratamiento y rapidez del transporte de materias primas y alimentos.
- 4) La teledetección (sensores remotos) permite hoy día conocer de modo barato y rápido los usos

del suelo y sus variaciones, lo cual permite tener una información muy importante sobre el uso del agua verde y azul para en la producción de biomasa.

- 5) Finalmente los avances en informática permiten obtener toda la información necesaria de modo sencillo y económico y hacerla accesible a todas las partes interesadas en la gestión del agua.

Ninguno de estos avances es en sí una panacea y todos tienen sus limitaciones o inconvenientes. De todas formas, su aplicación puede eliminar o mitigar de modo rápido muchos de los conflictos hídricos actuales.

## 1. INTRODUCCIÓN

El año 2003 fue declarado Año Internacional del Agua Continental por las Naciones Unidas. En su Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica de la Real Academia de Ciencias del año 2003 se incluyó una conferencia con el título “La crisis del agua: mito o realidad”, que fue impartida en diversos centros culturales de nuestro país. Más recientemente las mismas Naciones Unidas han instituido el Decenio Internacional del Agua 2006-2015. Estos hechos ponen de manifiesto la relevancia que a escala planetaria están adquiriendo las cuestiones relacionadas con el conocimiento, uso y gestión de los recursos hídricos. Esta importancia es obvia en nuestro país —y especialmente en las regiones mediterráneas— donde en los últimos años los conflictos relacionados con el agua ocupan con relativa frecuencia los titulares de los medios de comunicación.

El trabajo que ahora se presenta es una puesta al día de la conferencia del 2003, ya que en los dos años largos transcurridos se han producido algunos cambios significativos. Además, la crispación política por los temas del agua no puede decirse que haya disminuido, en buena parte debido a la sequía que desde hace dos años sufre España.

El tema del trasvase del Ebro se politizó y continúa politizado. En el año 2004 el nuevo Gobierno mediante un Decreto-Ley canceló todo lo referente al Trasvase del Ebro del Plan Hidrológico Nacional del año 2001. En 2005 aprobó un nuevo Plan Hidrológico Nacional, con su "Programa A.G.U.A.", que está basado principalmente en la construcción de desaladoras de agua de mar para sustituir al cancelado trasvase del Ebro.

En buena parte, estos problemas están relacionados con la todavía escasa asimilación por el gran público (y por los políticos) de los recientes e importantes cambios en los modelos o paradigmas en la gestión del agua. Estos cambios se deben tanto a los avances de la Ciencia y de la Tecnología como a los nuevos valores que predominan en nuestra sociedad. La Academia de Ciencias en particular y las Universidades en general, pueden y deben contribuir no solo al avance de estos conocimientos científicos sino a su difusión en la sociedad. Este artículo es un intento más en este sentido.

## 2. ENFOQUE

Uno de los objetivos de este artículo es mostrar la importancia social y económica que hoy tiene el uso de las aguas subterráneas en España. También hacer ver que la falta de adecuada concienciación sobre este hecho ha sido, y es, una causa radical de los frecuentes conflictos sociales y políticos que se han producido tanto en relación con la aprobación de la Ley del Plan Hidrológico Nacional en Julio del 2001, como con la modificación de esta Ley en el año 2005.

Ahora bien, no todos estos problemas están relacionados con las aguas subterráneas. Otros nuevos avances tecnológicos tienen también influencia. Entre ellos sólo se consideran en este artículo los relativos a la ingeniería química de membranas, al comercio de

agua virtual, al poderoso instrumento que hoy proporciona la observación de la tierra desde satélites y al uso de Sistemas de Información Geográfica.

Dentro de la necesaria brevedad de este trabajo se ha procurado presentar la situación española dentro del contexto europeo y mundial. En otras palabras, lo que ocurre en España no es muy diferente a lo que sucede en casi todos los países áridos o semiáridos (Llamas and Custodio, 2003). En prácticamente todos ellos en el último medio siglo se ha producido una auténtica "revolución silenciosa", consistente en el uso intensivo de las aguas subterráneas realizada en España por cientos de miles de pequeños agricultores (Fornés et al., 2005). Como en otros países, en España el "lobby" o grupo de presión de estos agricultores, en coordinación con otros grupos de presión, fue capaz de convencer a los políticos en el poder para que se aprobara "democráticamente", es decir en el Parlamento, la realización de ese trasvase del Ebro, que se iba a construir esencialmente con dinero público (Arrojo, 2003; Llamas y Martínez-Santos, 2005).

Ahora bien, otros grupos de presión o "lobbies", promovieron una clara oposición al trasvase del Ebro. El choque entre esos "lobbies" es en gran parte lo que ha producido los actuales conflictos sociales y políticos. Es importante señalar ahora que casi nunca en los debates sobre esos conflictos se alude a que una causa radical de los conflictos está en el "auténtico caos" de la gestión española de las aguas subterráneas. Ya en el año 2001 este autor escribió que si previamente ese "caos" no se resolvía, de poco iba a servir el trasvase del Ebro, si es que alguna vez se hacía.

En los debates anteriores al cambio de gobierno del 2004, tanto en los de Bruselas como en otros muchos que tuvieron lugar en España, puede decirse que apenas si se hizo mención de que el desgobierno en la gestión de las aguas subterráneas era la causa principal o radical de los conflictos. Por ejemplo, gran parte del nº 57 (Septiembre, 2003) de la Revista Cultural "Archipiélago" estaba dedicado a la problemática del agua. Pues bien, en ninguno de los ocho artículos dedicados al tema y escritos por autores tan conocidos como Naredo, Arrojo, Aguilera, se trata el tema de las aguas subterráneas. Una de las escasas excepciones, y no está en "Archipiélago", es un artículo en inglés que tiene por autor al entonces jefe del Área de Aguas

Subterráneas del Ministerio de Medio Ambiente (Sánchez, 2003). En ese trabajo el autor reconocía que la “sobreeplotación” de las aguas de la cuenca del Segura fue una causa principal del trasvase. También es significativo mencionar que el tema del impacto que en la política hidrológica española van a tener las decisiones de la Unión Europea en relación con las subvenciones agrarias y con el comercio internacional prácticamente apenas ha sido tratado por autores españoles (Llamas, 2005a).

Con intención de contribuir a resolver el actual caos en las aguas subterráneas el Ministerio de Medio Ambiente inició en el año 2002 un plan de actualización de los usos y derechos de aguas, titulado plan ALBERCA. Este plan debería estar terminado en el año 2008. (Ferrer, et al., 2004). Sin embargo algunos autores han considerado que ese plan es insuficiente pues no va a inventar ni la mitad de las captaciones existentes. (Llamas, 2005a).

En los últimos meses el gobierno ha tomado otras dos iniciativas para contribuir a resolver el problema. La primera es iniciar un plan de fuertes sanciones a pozos ilegales. La segunda es la preparación de una modificación de la Ley de Aguas que pretende mejorar la gestión de las aguas subterráneas. La primera iniciativa –la de las sanciones– podrá ser efectiva si se hace de una forma objetiva y clara, lo cual hasta ahora no es evidente. Así por ejemplo, en octubre de 2005 se anunció profusamente en los medios de comunicación que el Ministerio de Medio Ambiente había iniciado 2.000 expedientes sancionadores a pozos ilegales y a extracciones legales que se excedían del volumen permitido en el Registro y Catálogo de Aguas. Dado que existen unos dos millones de pozos ilegales o ilegales, esto supone que es aproximadamente se está sancionando a el uno por mil de los pozos irregulares existentes en España. Además, según la prensa, a principios de 2006 la Ministra de Medio Ambiente prometió una moratoria a algunos agricultores de Castilla-La Mancha, cuyos pozos ilegales iban a ser clausurados por la Confederación Hidrográfica del Guadiana en virtud de sentencia judicial firme.

La otra iniciativa, era la de una posible Ley de “punto final”, o de amnistía de los pozos ilegales reabriendo el plazo para inscribirse en el Registro o en el Catálogo de Aguas. Esta iniciativa encontró una

fuerte oposición, principalmente por grupos conservacionistas. El Gobierno reaccionó diciendo que se trataba de un estudio preliminar y que no se daría esa especie de amnistía. No es fácil predecir cuál será el resultado de esa posible modificación de la Ley de Aguas. Ahora bien, si se aplica igual de mal que la Ley de Aguas de 1985 va a ser tiempo perdido. Como ya hace años dijo el conocido jurista S. Martín Retortillo lo más importante es que haya voluntad política de hacer cumplir la ley de aguas, lo cual no se ha hecho en los últimos veinte años.

### **3. EL AGUA SUBTERRÁNEO, DE RECURSO MISTERIOSO A GENERADOR DE UNA REVOLUCIÓN SILENCIOSA**

#### **3.1. El panorama mundial**

Con frecuencia se ha escrito que las primeras civilizaciones pueden definirse como hidráulicas. Nacieron hace unos cincuenta o sesenta siglos en algunos grandes valles de regiones áridas. En esos valles el hombre nómada y cazador se transformó en agricultor y comenzó el regadío con obras sencillas. La gestión de esos regadíos no pudo ser realizada individualmente. Requirió un esfuerzo colectivo, que a su vez condujo a una sociedad estructurada que comenzó a vivir agrupada en núcleos urbanos, en “civis”. Esa tradición de trabajo colectivo para la construcción y operación de infraestructuras hidráulicas se han mantenido hasta nuestros días, pero se intensificó mucho en el siglo XX. Casi sin excepción, todas las grandes obras hidráulicas, construidas en su casi totalidad en los últimos cien años, han sido acciones colectivas, financiadas y controladas por organismos gubernamentales. En contraste, el aprovechamiento de las aguas subterráneas mediante pozos y/o galerías filtrantes pudo, y puede, ser realizado de modo individual o por pequeñas colectividades. En general y hasta hace medio siglo, los caudales obtenidos con estas pequeñas infraestructuras eran reducidos y los regadíos o abastecimientos urbanos correspondientes no eran importantes. Es más, el origen, localización y movimiento de las aguas subterráneas se consideraba como algo misterioso, en donde era muy difícil encontrar una relación clara entre los efectos y sus causas. (Llamas, 2005b).



**Figura 1.** Ejemplo de pozo excarvado tradicional.

Sin embargo, en el último medio siglo la situación ha cambiado notablemente debido principalmente a los avances tecnológicos en la perforación de pozos y en los sistemas de bombeo. Estos dos factores han conducido a un notable abaratamiento en los costes de extracción de aguas subterráneas, lo que ha inducido el aumento espectacular en su uso en prácticamente todos los países áridos o semiáridos (Llamas y Custodio, 2003). Quizá el caso más notable sea la India donde se han puesto en regadío con aguas subterráneas más de 40 millones de hectáreas en los últimos cuarenta años. Y ese país ha pasado de padecer hambrunas frecuentes y generalizadas a convertirse en un importante exportador de grano (Shah, 2005). Este desarrollo del agua subterránea ha sido usualmente financiado y realizado por particulares o pequeños municipios.

### 3.2. La hidroesquizofrenia española

La intervención planificadora y controladora de los organismos gubernamentales en la gestión de las aguas subterráneas ha sido muy reducida en casi todo el mundo. Ello llevó a R. Nace, un conocido hidrólogo norteamericano, a describir, en una breve nota publica-

da en 1972, como “hidroesquizofrenia” la actitud de los gestores del agua que separaban totalmente la gestión de las aguas subterráneas de la de las aguas superficiales; siendo estas últimas las únicas que consideraban en la mayor parte de los casos. Esa inhibición gubernamental ha dado origen a problemas de distinto tipo, por lo general presentados al gran público de forma exagerada y con escasos datos. El resultado es que en amplios sectores de la sociedad predomina el “hidromito” de que las aguas subterráneas son un recurso muy frágil. “Todo pozo termina por secarse o salinizarse” es uno de los falsos paradigmas mundialmente difundidos (Custodio, 2002; López Gunn and Llamas, 2000).

Como se resume en Llamas (2005c), la primera evaluación cuantitativa de los recursos de agua subterránea de España se realizó en 1966. En un artículo de 1968 se expusieron los resultados del Estudio de Recursos Hídricos Totales realizados en los Ríos Besos y Bajo Llobregat y se propuso la realización de estudios análogos en toda España. Esto es lo que luego vino a exigir la Ley de Aguas de 1985. En ese artículo



**Figura 2.** Un pozo perforado moderno puede realizarse en pocas semanas hasta profundidades de un millar de metros.

también se hacía ver el interés de una explotación intensiva de las aguas subterráneas en la Cuenca del Segura en tanto que llegaba el agua del trasvase del Tajo, entonces en proyecto avanzado. Esto era propuesto como una solución temporal y exigía que la Confederación Hidrográfica del Segura tomara en serio la gestión de las aguas subterráneas de su cuenca, tal como ya se había hecho en la Confederación Hidrológica del Pirineo Oriental. En la Cuenca del Segura la atención que se prestó a esas recomendaciones fue prácticamente nula. Una excusa general para esa inoperancia, por parte de las Confederaciones Hidrográficas, en relación con la gestión de las aguas subterráneas, consistía, y todavía consiste, en aludir al carácter privado de este tipo de aguas. Esta excusa suele ser frecuentemente repetida por dirigentes de estos organismos (cf. Díaz Mora, 2002). Muchas veces este autor ha sostenido de palabra y por escrito que esa razón era, y es, inconsistente.

Como se indica en Llamas (2005c), inspirado en la breve nota del hidrólogo americano antes mencionado, este autor a partir de los años setenta comenzó a utilizar la expresión “hidroesquizofrenia” para designar la actitud de aquellos gestores de recursos hídricos que separaban totalmente lo que se refería a las aguas superficiales y a las aguas subterráneas, en general con olvido o desprecio de las segundas. Desde entonces los libros y/o artículos sobre las aguas subterráneas, escritos por autores españoles, son numerosos. Estos trabajos no sólo se refieren a la Hidrología Subterránea, sino que tocan otros muchos aspectos legales, sociales, económicos, ecológicos e institucionales. A modo de ejemplo, en los Seminarios del Proyecto Aguas Subterráneas de la Fundación M. Botín, desarrollado entre 1999 y 2003 han participado, unos doscientos expertos, en su mayoría españoles (Llamas 2003 b).

Por otra parte, lo ocurrido en la Cuenca del Segura después de 1968, también ha sucedido y sucede en otros muchos sitios de España y del mundo. Se ha producido un enorme vacío entre las administraciones hidráulicas y los usuarios de aguas subterráneas, en su mayor parte, modestos agricultores. Ese vacío sigue casi igual veinte años después de haberse promulgado la Ley de Aguas de 1985 que teóricamente atribuye grandes competencias de control y planificación de las aguas subterráneas a las Confederaciones Hidrográficas.



**Figura 3.** Las antiguas norias han desaparecido.

Las antiguas norias han desaparecido. La situación actual real en casi toda España, y especialmente en las Cuencas del Segura y del Guadiana, es de auténtico caos jurídico y administrativo. En algunas zonas ese uso intensivo e incontrolado de las aguas subterráneas ha originado problemas de diversos tipos. Irónicamente, en vez de pensar en corregir ese auténtico caos, la solución propuesta ha sido la de “premiar” a los “depredadores de acuíferos” y a sus inoperantes vigilantes mediante la construcción de una gran infraestructura hidráulica. Era el trasvase del Ebro, que iba a ser pagado esencialmente con dinero público y tenía por objeto llevar cada año un kilómetro cúbico de agua del río Ebro a la región mediterránea con la principal finalidad de recuperar los acuíferos. La solución alternativa propuesta en el Plan Hidrológico Nacional de 2005 en el fondo no difiere mucho, ya que las desaladoras de aguas de mar van a ser esencialmente financiadas en la mayoría de los casos con fondos públicos. En otras palabras, se continúa con una política de oferta y no de gestión de la demanda, como ya anunciaron varios expertos del Consejo Nacional del Agua (Sahuquillo, et al., 2004 y 2005).

### 3.3. La revolución silenciosa del uso intensivo de las aguas subterráneas

#### 3.3.1. Las causas

La generalizada actitud hidroesquizofrénica por parte de muchos organismos responsables de la gestión del agua no ha sido obstáculo para que en casi todos los países áridos o semiáridos en el último medio siglo se haya producido, y se continúe produciendo, un



**Figura 4.** Regadío de fresas “en tunel” con aguas subterráneas en Doñana.

aumento espectacular en el uso de las aguas subterráneas. Este fenómeno fue calificado por primera vez como una “revolución silenciosa” en la presentación del Proyecto Aguas Subterráneas de la F. Marcelino Botín, que se hizo en el Tercer Foro Mundial del Agua (Osaka, 18 Marzo 2003) (Llamas, 2003). En 2004 fue también presentado en una reunión del World Water Council en Marsella (Fornés, et al., 2005); en 2005 en un editorial invitado de la American Society of Civil Engineers (Llamas and Martínez-Santos, 2005). Es revolución porque está produciendo importantes impactos sociales y económicos. Es silenciosa porque ha sido realizada sin ruido, sin aparatosas ceremonias de inauguración. Sus autores principales han sido millones de agricultores modestos que en casi todas las regiones áridas y semiáridas del planeta han perforado millones de pozos. Como ya se ha dicho, el caso más espectacular de uso de las aguas subterráneas está en la India, donde actualmente se bombean más de 200 km<sup>3</sup>/año y más del 60% de las superficies de regadío se hace con aguas subterráneas (Shah, 2005). Dicho autor estima que mundialmente hoy se bombean probablemente entre 700 y 1000 km<sup>3</sup>/año. En un reciente informe del Banco Mundial sobre la política del agua en la India califica esta situación como una “quiet revolution” (Briscoe, 2005). En España esta cifra se reduce probablemente a unos cientos de miles de agricultores y, al menos, a un bombeo de unos 6 ó 7 km<sup>3</sup>/año, aunque esta cifra puede tener un margen de error grande. Estos agricultores han realizado esa extracción con poca o nula ayuda técnica o financiera por parte de los organismos responsables de los recursos hídricos, incluso después del uno de enero de 1986,

cuando entró en vigor la nueva Ley de Aguas, muchas veces han perforado sus pozos de modo ilegal. En España, la “insumisión hidrológica”, es decir la perforación de pozos sin los oportunos permisos, es un hecho patente en algunas regiones como el Alto Guadiana o el Segura. La incierta y opaca situación de las aguas subterráneas en el Segura fue ya puesta de manifiesto en Llamas et al. (2001). Como antes se dijo, en octubre de 2005 el Ministerio de Medio Ambiente anunció profusamente en los medios de comunicación que desde abril de 2004 había abierto 2.000 expedientes a pozos ilegales y a extracciones legalizadas que se excedían del consumo permitido. Esto podría ser un buen comienzo, pero nada más, ya que probablemente esa cantidad afecta al uno por mil de los pozos existentes. Además, conviene recordar que abrir un expediente sancionador no significa que al final se sancione al supuesto infractor. De hecho, esto es lo que parece haber ocurrido en muchos de esos expedientes sancionadores, que han prescrito o han sido desestimados por los tribunales de justicia, como ha ocurrido en el alto Guadiana (Llamas, 2005c).

La principal causa de este aumento en el uso de las aguas subterráneas para regadío radica en que el coste del regadío con aguas subterráneas suele suponer sólo una pequeña fracción del valor de las cosechas que esas aguas garantizan. Las aguas subterráneas, si no proceden de acuíferos pequeños o muy poco permeables, no son afectadas por las sequías. Esto ha conducido a que casi siempre las cosechas de alto valor, que exigen fuertes inversiones, se hagan usualmente basándose en aguas subterráneas o en sistemas mixtos de aguas superficiales y subterráneas. Esta última solución, cuando es posible, es la más favorable para el agricultor. Las aguas superficiales son casi gratis (para el agricultor, no para el país) y lógicamente son las utilizadas mientras se dispone de ellas. Ahora bien, si se produce un fallo en el suministro de aguas superficiales por sequía o por otra causa, el agricultor tiene garantizado el suministro de agua mediante el bombeo de su pozo.

### 3.3.2. Costes y beneficios del uso intensivo de las aguas subterráneas

En Llamas y Custodio, (2003), se presentaron hasta 22 trabajos en los que con carácter multidisciplinar se analizaba lo que había sido el uso intensivo del agua

subterránea en un conjunto de regiones de todo el mundo. A ese libro se remite al lector interesado en más detalles. De modo resumido se puede decir que 1) hasta la fecha los beneficios de esa revolución silenciosa han sido mucho mayores que los costes o problemas; 2) gran parte de los problemas presentados en cuanto a la “fragilidad” de las aguas subterráneas son exageraciones sin datos fehacientes, que han sido difundidos por una mezcla de ignorancia, arrogancia, negligencia y corrupción y 3) sin embargo, la frecuente situación de descontrol o de caos casi total debería ser encauzada pronto pues ha comenzado a producir efectos económicos negativos que consisten principalmente en unos descensos excesivos de los niveles de bombeo (hasta casi 500 m en algunos acuíferos de Alicante, en general de extensión reducida) y a un deterioro de la calidad del agua. Los efectos ecológicos de la extracción de las aguas subterráneas pueden ser importantes, como es el caso del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel. Ahora bien, la valoración social de estos daños ecológicos varía mucho de acuerdo con la situación socio-económica de cada país.

Los regantes de aguas subterráneas ya han reaccionado ante estos efectos económicos negativos, todavía poco relevantes para el conjunto de los regadíos españoles. Gracias a la extracción de aguas subterráneas estos agricultores han aumentado sensiblemente su nivel de vida, su formación tecnológica y su capacidad de asociación. Su principal actuación ha consistido en organizar una campaña para convencer al resto de los españoles que deben llevar agua de donde sea y al coste que sea hasta el “sediento” SE español y especialmente a la cuenca del Segura. A esa campaña se han sumado otros “lobbies”. Ahora bien, también han aparecido otros “lobbies” que han organizado su campaña contra el trasvase del Ebro. Estos “lobbies” enfrentados han sido los catalizadores de los conflictos sociales relacionados con la política del agua en España.

#### 4. LA “FABRICACIÓN DEL AGUA”

En los últimos años se viene hablando con insistencia de la necesidad de reutilizar las aguas ya usadas en otros usos y tratar de obtener “nuevas aguas” procedentes del mar o de aguas subterráneas salobres. Este es un hecho claro que ha sido posible por un notable avance tecnológico de gran alcance práctico.

La reutilización de aguas residuales urbanas en regadíos se he hecho —y se hace todavía en muchos países— desde tiempos inmemoriales. Ahora bien, esto se hizo sin apenas tratamiento de esas aguas y condujo a epidemias o pandemias, como la del tifus que existió en Madrid hasta hace algo más de medio siglo debido al uso de las aguas residuales de Madrid sin tratar en las huertas del Jarama. Hoy día ese tema prácticamente ha desaparecido por un doble motivo. En primer lugar, el tifus ha sido prácticamente erradicado. El agua no produce los gérmenes del tifus sino que simplemente los transporta. En segundo lugar, hoy día las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) se han multiplicado y funcionan cada vez mejor.

Todo esto está también relacionado con la necesidad de comenzar a estudiar la oportunidad de fomentar la realización de dobles redes de distribución de agua; unas para agua perfectamente potable y otras para otros servicios como pueden ser la limpieza de calles, el riego de jardines, etc., que no requieren agua de tan elevada calidad y podría ser el agua tratada por ósmosis inversa o por procedimientos más sencillos. De hecho en algunas ciudades de España, como Murcia, ya funcionan redes dobles.

En los últimos decenios el gran avance se ha producido en la ingeniería química en la denominada tecnología de membranas u ósmosis inversa. Esto permite eliminar del agua casi todos los elementos nocivos que tenga; y esto con un precio ya razonable y en constante descenso. La aplicación principal de esta tecnología está siendo la desalación del agua de mar o de aguas subterráneas salobres.

De hecho la alternativa propuesta al cancelado trasvase del Ebro previsto en el PHN-2001 ha sido la construcción de una veintena de plantas desaladoras de agua de mar. Es el denominado **PROGRAMA A.G.U.A.** En Llamas (2005a) se consideraba poco probable que este **PROGRAMA A.G.U.A.** llegase a funcionar en lo que se refería al uso de agua de mar desalada para regadío, cosa distinta se pensaba para las destinadas para abastecimiento a las nuevas urbanizaciones y campos de golf. Es cierto que los cultivos de alto valor en Murcia y Almería podrían pagar el coste total de esta agua de mar desalada (entre 0,6 y 1,2 €/m<sup>3</sup>, según diversos autores) pero esos agricul-

tores no se van a negar a pagar esos precios mientras puedan (legal o ilegalmente) comprar agua subterránea a un precio que suele oscilar entre 0,1 y 0,2 €/m<sup>3</sup>. Es decir mientras no se corrija el caos antes descrito en la gestión de las aguas subterráneas es muy poco probable que los agricultores españoles estén dispuestos a utilizar agua de mar desalada incluso aunque prácticamente esté subvencionada en más del 50% de su coste. Además, esa posible subvención iría contra el principio general de la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea que pide que los beneficiarios de las obras hidráulicas paguen su coste total.

No obstante, tampoco se puede mantener un ingenuo optimismo sobre el uso de agua de mar desalada para usos urbanos. Sería oportuno realizar un análisis económico de la ocurrido con las plantas desaladoras que ya existen en España, como son las de Marbella y Almería. Por ejemplo, según el Grupo Ecologista Mediterráneo (2004), la planta desaladora de Almería, terminada hace ya cuatro años no ha entrado prácticamente en funcionamiento. La razón es muy sencilla, el Ayuntamiento de esta ciudad sigue comprando agua subterránea, que es más barata.

## 5. CONCEPTO DE HUELLA HIDROLÓGICA Y COMERCIO DE AGUA VIRTUAL

El agua utilizada en el proceso de producción de un bien cualquiera (agrícola, alimenticio, industrial) ha sido denominada «agua virtual». Este concepto fue introducido en la década de los noventa por Allan (2006). Desde entonces está siendo tratado por autores diversos y desde diversos puntos de vista (Llamas, 2005a).

Si un país exportara un producto que exige agua virtual para su producción es equivalente a que está exportando agua, pues de este modo el país importador no necesita utilizar agua nacional para obtener ese producto y podría dedicarla a otros fines. La importación de agua virtual está facilitando que los países pobres en recursos hídricos consigan seguridad alimentaria e hidrológica. De este modo pueden destinar sus limitados recursos hídricos a fines más lucrativos, como pueden ser el turismo o la industria o el abastecimiento urbano o la producción de cosechas de alto valor.

Siempre ha existido comercio de alimentos y, por consiguiente, de agua virtual. Basta recordar el episodio bíblico, narrado en el capítulo 42 del Génesis, del viaje de la familia de Jacob a Egipto para comprar trigo al Faraón, debido a la sequía que padecía la región de Palestina. En Egipto, José, otro israelita a la sazón equivalente a Ministro de Agricultura, había tenido la precaución de almacenar trigo en los años húmedos (de vacas gordas) en previsión de que llegasen los años secos (de vacas flacas).

En los últimos lustros el comercio de alimentos se ha incrementado mucho debido en buena parte a las políticas agrarias y al aumento de productividad; pero en otra parte no despreciable a que los avances tecnológicos han abaratado y facilitado el transporte de modo muy notable. En una primera aproximación puede estimarse que el coste del transporte marítimo de una tonelada de casi cualquier materia prima es del orden de un euro, es decir, bastante menos de un céntimo de euro por kilo. Este precio es casi independiente de la distancia que tenga que recorrer el barco. Esto explica, por ejemplo, que hoy en los mercados de España se puedan comprar kiwis procedentes de Nueva Zelanda o manzanas o ciruelas que vienen de Chile a precios competitivos con los de los equivalentes frutos producidos en España.

El comercio de agua virtual puede permitir a los países de escasos recursos hídricos evitar lo que hasta hace muy poco se consideraba una probable e inminente crisis. Casi la única condición requerida es que esos países tengan un nivel económico que les permita comprar en los mercados internacionales los alimentos portadores de agua virtual. Como se verá después, esos



**Figura 5.** Todavía en muchas zonas la búsqueda de aguas subterráneas es realizada por “zahorías”.

productos son principalmente los alimentos básicos (como los cereales, el arroz o los forrajes) cuyo valor por tonelada (o metro cúbico de agua virtual) es bastante bajo. Casi todos los países importan y exportan agua virtual, pero el balance puede ser muy distinto de unos a otros. Por ejemplo, Canadá exporta grandes cantidades de agua virtual con sus masivas ventas de cereales, pero al mismo tiempo importa agua virtual de Centro América cuando importa flores y frutos de esa región. Jordania importa grandes cantidades de agua virtual con sus compras de cereales (de bajo valor), pero al mismo tiempo exporta agua virtual en cultivos de alto valor (cítricos y hortalizas) que se dan muy bien en su clima.

En la Tabla 1 se indica el agua virtual necesaria para obtener algunos productos de uso generalizado.

CANTIDADES DE AGUA (LITROS) PARA PRODUCIR UNA UNIDAD DE ALGUNOS BIENES	
Botella de cerveza (250 ml)	75
Vaso de leche (200 ml)	200
Rebanada de pan (30 gr.)	40
Una camiseta de algodón (500 gr.)	4.100
Una hoja de papel A-4 (80 gr./m <sup>2</sup> )	10
Una hamburguesa (150 gr.)	2.400
Un par de zapatos (piel de vaca)	8.000
Carne de vaca (1 kgr)	15.000
Carne de cordero (1 kgr)	10.000
Carne de pollo (1 kgr)	6.000
Cereales (1 kgr)	1.500
Aceite de Palma (1 kgr)	2.000
Cítricos (1 kgr)	1.000

Fuente: Llamas (2005a) tomado de Chapagain & Hoekstra, 2004.

El concepto de huella hidrológica se ha utilizado como un indicador del uso del agua por las personas, grupos colectivos o países. Puede definirse como el volumen de agua que es necesario para la producción de los bienes y servicios que utiliza una persona o un grupo colectivo de personas. Obviamente, es un concepto íntimamente ligado al de agua virtual.

La suma total del uso de agua nacional (verde y azul) y del agua neta importada se define como la huella hidrológica de ese país o grupo colectivo. Se ha

estimado que el valor de la huella hidrológica total de la humanidad actual es de 7.500 km<sup>3</sup>/año. Este aumento se debe principalmente a que añaden el agua necesaria para los usos domésticos y urbanos y para la elaboración de productos industriales. En cualquier caso, es interesante recordar que la precipitación en las tierras emergidas, es decir, la suma del agua azul y verde que cada año circula en el ciclo hidrológico es del orden de 115.000 km<sup>3</sup>. En otras palabras, desde un punto de vista global las necesidades de agua (azul y verde) de la humanidad actual quedan bastante por debajo del 10% de las precipitaciones anuales. De todas formas, estas son cifras globales que solo deben ser consideradas como una primera aproximación, pues los problemas reales tienen un carácter local.

En Llamas (2005a) puede verse que la huella hidrológica de España, Italia y Estados Unidos son muy parecidas —unos 2.300 m<sup>3</sup>/persona y año; en cambio la de la India apenas llega a 1.000 m<sup>3</sup>/persona y año. Esto se debe fundamentalmente al régimen vegetariano de buena parte de la población india y a su menor industrialización.

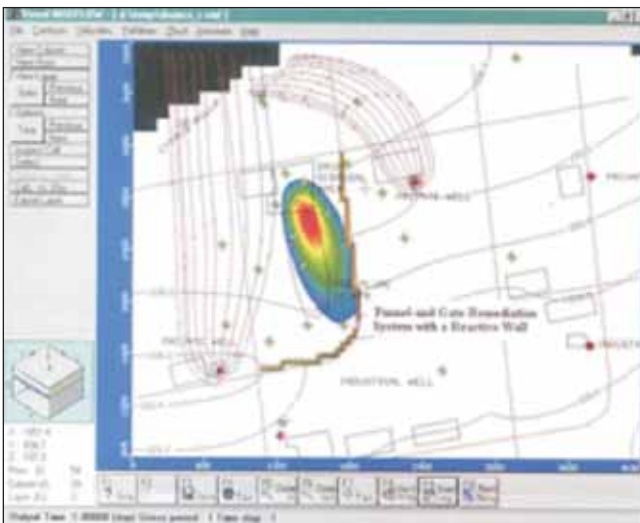
Como datos significativos cabe mencionar que España importa 45 km<sup>3</sup>/año de agua virtual y exporta unos 31 km<sup>3</sup>/año, es decir el balance es negativo. El 80% de lo 100 km<sup>3</sup>/año que supone la huella hidrológica total de España un 5% es para uso urbano y doméstico; 80% para producción de alimentos (de estos 2/3 con agua nacional y 1/3 con agua virtual importada) y un 15% para productos industriales (de estos algo más de la mitad corresponde a productos industriales importados). Estas cifras ponen de manifiesto la importancia que en la política del agua de España, y de cualquier país semiárido, tiene el sector agrícola. Este es un aspecto todavía poco considerado en España y en la mayor parte de los países.

## 6. IMPORTANCIA DE LOS SENSORES REMOTOS Y DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA GESTIÓN DEL AGUA

Para terminar esta sucinta exposición sobre el influjo, generalmente muy positivo, de los avances tecnológicos en la solución de los problemas o conflictos

hídricos, se van a mencionar dos aspectos que tienen una gran importancia de carácter más bien indirecto (Chuvieco, 2002; Bosque, 1997; Schulz et al., 2000; Gurnell and Montgomery (2000).

El primero es el uso de la teledetección que observa y cuantifica los usos del suelo y sus cambios. Hoy día el uso de los sensores remotos es barato y permite medir con precisión cada vez mayor las superficies regadas y los tipos de cultivos. Este es un elemento esencial para la política del agua ya que el regadío supone, como repetidamente se ha dicho, el 80 ó 90% de los usos consuntivos del agua.



**Figura 6.** Los modelos matemáticos digitales del flujo de las aguas subterráneas son hoy una herramienta de uso normal.

Sin embargo, excepto en Andalucía (Vives, 2000) en la mayor parte de las Confederaciones Hidrográficas y en las Consejerías de Agricultura de la C.C.A.A. estos datos no existen o no están disponibles, a pesar de que su obtención es relativamente rápida y barata, como ha demostrado ya desde hace casi un decenio la Junta de Andalucía (Vives, 2003).

El otro gran avance tecnológico es la generalización de los Sistemas de Información Geográfica. En un plazo breve sería necesario que cualquier persona, desde su casa por Internet o sistema análogo tuviera fácil acceso a la información existente en las Confederaciones Hidrográficas y en las Consejerías de Agricultura sobre los datos de las captaciones de agua existentes en cualquier zona y sobre los regadíos. Mientras esos datos no estén fácilmente disponibles

los debates o conflictos sobre el agua estarán llenos de datos difusos por no decir falsos. Esto hace que las partes en conflicto acudan a las negociaciones con una gran desconfianza.

## 7. CONCLUSIONES

De lo anteriormente expuesto pueden sintetizarse las siguientes conclusiones.

### PRIMERA

Las aguas subterráneas están ya jugando un papel sumamente importante en el regadío y también en el abastecimiento del agua potable de usuarios particulares y de pequeños núcleos urbanos.

### SEGUNDA

Los avances científicos y tecnológicos del último medio siglo permiten afrontar con moderado optimismo los problemas hídricos de la costa mediterránea española, y de la mayor parte de las regiones áridas y semiáridas.

### TERCERA

Los notables avances obtenidos en la tecnología de membranas permite pensar en plazo no largo que las aguas residuales urbanas podrían ser reutilizadas para múltiples usos, aunque de momento no como agua potable.

### CUARTA

El uso de agua de mar desalada para abastecimiento urbano y turístico es ya una realidad importante. Ahora bien, convendría disponer de estudios rigurosos sobre su coste real.

### QUINTA

Probablemente en un futuro próximo va a tener poco sentido económico y ecológico que se utilice agua de buena calidad para el regadío de productos de bajo precio. Éste debería ser atendido con aguas residuales tratadas o sencillamente abandonando los regadíos de poco valor y dedicando ese agua a otros usos más rentables y/o ecológicamente más adecuados.

**SEXTA**

Es urgente crear un clima de mutua confianza entre las partes en conflicto. Esto requiere como condición **sine qua non** una mayor claridad y transparencia en los datos de los usos y derechos del agua.

**SÉPTIMA**

Parece imprescindible que tanto las Confederaciones Hidrográficas como las Comunidades Autónomas mejoren sensiblemente su conocimiento de los acuíferos de su zona, así como el inventario de usos y derechos sobre las aguas subterráneas y de los regadíos. Todos estos datos deberían ser fácilmente accesibles en un breve plazo al público en general a través de Internet o sistema análogo.

**BIBLIOGRAFÍA**

1. Allan, A. (2006): "Virtual Water, Part of an invisible synergy that ameliorates water scarcity" in *Water Crisis: Myth or Reality?* (Rogers, Llamas and Martinez, eds.) Taylor and Francis Group. London, pp. 131-150
2. Arrojo, P. (2003) "El Plan Hidrológico Nacional", RBA Libros, S.A., Barcelona, 207 p.
3. Bosque, J. (1997) "Sistemas de Información Geográfica", Madrid, Rialp.
4. Briscoe, J. (2005) "India's Water Economy: Bracing for a Turbulent Future" The World Bank, November 28, 2005.
5. Chuvieco, E. (2002) "Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio", Barcelona, Ariel Ciencia.
6. Custodio, E. (2002) "Aquifer Overexploitation: What does it mean". *Hydrogeology Journal*, Vol. 10, pp. 254-277.
7. Díaz Mora, J. (2002) "La clarificación jurídica de los acuíferos sobreexplotados: el caso de La Mancha Occidental", en Régimen Jurídico de las Aguas Subterráneas, (del Saz, et al. Eds.), Mundi Prensa, pp. 244-258.
8. Fornés, J. M.; Hera, A. de la, Llamas, M. R. (2005): "The Silent Revolution in Groundwater Intensive Use and its Influence in Spain", *Water Policy*, Vol. 7, No. 3, pp. 253-268. ISSN: 1366-7017.
9. Ferrer, J., Palmero, C., Gullón, N., Yagüe, J. y Xuclá, R. (2004) "El proyecto ALBERCA como ejercicio de modernización entre Administraciones" II Congreso Internacional de Ingeniería Civil. Colegio de Ingenieros de Caminos, pp. 97-106.
10. Garrido, A., Martínez-Santos, P. and Llamas, M.R. (2006) "Groundwater irrigation and its implications for water policy in semiarid countries: the Spanish experience", *Hydrogeology Journal*, Vol. 14, No. 3, pp. 340-349.
11. Grupo Ecologista Mediterráneo (GEM) (2004) "Los problemas del agua en Almería", 36 pp. [www.gem.es](http://www.gem.es).
12. Gurnell, A.M. and Montgomery, (Eds) (2000) "Hydrological Applications of GIS", by John Wiley & Sons.
13. Llamas, M.R. (2005a) "Los Colores del Agua, El Agua Virtual y los Conflictos Hídricos", Discurso Inaugural, Curso 2005-2006, Real Academia de Ciencias Exáctas, Físicas y Naturales, Madrid 30 p.
14. Llamas, M.R. (2005b) "Una causa radical de los conflictos del agua en España". *Tecnología del Agua*, No. 259, Abril 2005, pp. 72-76. (publicado también en "El Estado de España", Real Academia de Doctores, Madrid, 2005.
15. Llamas, M.R. (2005c) "Lecciones aprendidas en tres décadas de gestión de las aguas subterráneas en España y su relación con los ecosistemas acuáticos" Lecciones Fernando González Bernáldez nº 1, Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez, Universidad Autónoma de Madrid, 66 p.
16. Llamas, M.R. (2003). "El Proyecto Aguas Subterráneas: resumen, resultados y conclusiones". Papeles del Proyecto Aguas Subterráneas. Fundación Marcelino Botín y Mundi-Prensa, Madrid, 101 pp.
17. Llamas, M.R. and Martínez-Santos, P. (2005) "Intensive Groundwater Use: Silent Revolution and Potential Source of Social Conflicts". *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, September/October 2005, pp. 337-341.
18. Llamas, M.R. and Custodio, E. (eds.) (2003) "Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities; Balkema Publishing Co., Dordrecht, Países Bajos, 478 p.
19. Llamas, M.R., Fornés, J., Hernández-Mora, N. y Martínez Cortina, L. (2001). "Aguas subterráneas: retos y oportunidades". Fundación Marcelino Botín y Mundi-Prensa. Madrid, 529 p.
20. López Gunn, E. and Llamas, M.R. (2000). "New and Old Paradigms in Spain's Water Policy", en "Water Security in the Third Millenium: Mediterranean Countries Towards a Regional Vision". UNESCO Science For Peace Series. Vol. 9, pp. 271-293.
21. Sahuquillo, A., Pérez Zabaleta, A. y Candela, L. (2005) "Comentarios al Informe de Sostenibilidad

- Ambiental de las Actuaciones urgentes del Programa A.G.U.A. en las Cuencas Mediterráneas” [www.unizar.es/fnca/docu/docusa.pdf](http://www.unizar.es/fnca/docu/docusa.pdf).
22. Sahuquillo, A., Pérez Zabaleta, A., Candela, L. y Hernández, S. (2004) “Informe sobre la Tramitación del Proyecto de Ley del Real-Decreto 2/2004 por el que se modifica la Ley 10/2001 del Plan Hidrológico Nacional. Madrid 29 de Septiembre de 2004” [www.unizar.es/fnca/docu/docusa.pdf](http://www.unizar.es/fnca/docu/docusa.pdf).
  23. Sánchez, A. (2003) “Major challenges for Groundwater in Spain” *Water International*, Vol. 28, No. 3, pp. 321-325.
  24. Schulz, G.A. and Engman, E.T. (Eds) (2000) “Remote Sensing in Hydrology and Water Management”, Springer.
  25. Shah, T. (2005) “Groundwater and Human Development: Challenges and Opportunities in Livelihoods and Environment”, *Water Science and Technology*, vol. 8, pp. 27-37.
  26. Vives, R. (2003) “Economics and Social Profitability of Water for Irrigation in Andalusia”, *Water International*, Vol. 3, pp. 326-333.