

La gestión de la recarga en la recuperación de acuíferos contaminados por intrusión marina - experiencias en Cataluña (España)

A. Pérez-Paricio

Agencia Catalana del Agua
C/ Provença, 204-208. 08036-Barcelona (España)
aperezpa@gencat.net

RESUMEN

Una buena gestión de los acuíferos costeros y, eventualmente, su recuperación, debería procurar la integración de todos los recursos hídricos convencionales (aguas superficiales y subterráneas) y no convencionales (reutilización y desalinización) disponibles con las debidas restricciones medioambientales y socio-económicas del territorio, sobre todo en regiones áridas. Cataluña (España) ha sido un buen ejemplo de degradación de sus acuíferos costeros, pese a las usuales proclamas en cuanto a su rol estratégico, aunque se está produciendo un cambio remarcable. Este artículo presenta formas diferentes de afrontar la intrusión marina en tres acuíferos catalanes, a partir de dos estrategias bien diferenciadas: la aportación de caudales externos para reducir las extracciones del acuífero (Francolí-Gaià) y el aprovechamiento integral de todos los recursos hídricos disponibles, convencionales y no (Delta del Tordera y Delta del Llobregat). Es este último enfoque el que se analiza en el artículo, enfatizando en la recarga artificial o gestión de la recarga mediante balsas y pozos de inyección. El autor actualiza los avances en el campo de la gestión de la recarga de acuíferos, incluyendo el aprovechamiento de aguas depuradas, e intenta plantear los retos pendientes para lograr su implantación rigurosa.

Palabras clave: estrategias de gestión, gestión de la recarga de acuíferos (recarga artificial), intrusión marina, medidas correctoras, reutilización

Managed aquifer recharge to restore aquifers contaminated by marine intrusion - experiences in Catalonia, Spain

ABSTRACT

A good management of coastal aquifers and, eventually, restoring them, should intend to integrate all the available conventional (surface water and groundwater) and non-conventional (reuse and desalination) water resources, subject to the environmental and socio-economical restrictions in the territory, mainly in arid regions. Catalonia (Spain) provides a good example of degradation of coastal aquifers, in spite of the usual references to their strategic role, but a conceptual change is taking place. This article presents approaches to face marine intrusion in three Catalan aquifers, based on two well-differenced strategies: substituting part of groundwater abstraction by external resources (Francolí-Gaià) and integral use of conventional and non-conventional resources (Tordera's and Llobregat's Delta). The article focuses on the latter, mainly on artificial groundwater recharge or managed aquifer recharge (MAR) through basins and injection wells. The author updates recent developments on MAR, including reclaimed water, and aims at defining the pending challenges for a rigorous implementation in our country.

Key words: corrective measures, managed aquifer recharge, management strategies, marine intrusion, reclaimed water

Introducción

La gestión de acuíferos en riesgo o afectados por intrusión marina en climas semiáridos como el del Mediterráneo español exige de un esfuerzo suplementario al habitual por la coexistencia de factores. Una gestión integral abarca por supuesto la faceta científico-técnica, pero ha de tener en cuenta la realidad demográfica, el estatus socio-económico, el marco político y la percepción social del agua, entre

otros (Murillo, 2005). La intrusión marina se debe a una explotación inadecuada de los recursos subterráneos en un contexto, por lo general, de escasez de agua para satisfacer los usos existentes o previstos. La suma de los factores antes apuntados hace que se hable de 'déficit estructural' o de 'gestión de la oferta', según se estime que hay una insuficiencia contrastada de la disponibilidad de agua o que los usos no están adaptados a la realidad de la zona, respectivamente.

Las medidas piezométricas y de calidad de las aguas subterráneas sugieren que la intrusión marina es un fenómeno habitual en los acuíferos costeros. Abarca *et al.* (2006) afirman que se ha dedicado mucho esfuerzo a la optimización de las estrategias de gestión, pero poco a la búsqueda de soluciones para los acuíferos ya salinizados. Cuando esto último ocurre, la realidad obliga a optimizar el diseño de las medidas correctoras con el fin de minimizar los cambios en el comportamiento de los usuarios. Pero los datos evidencian que esta situación es frecuente en numerosos acuíferos. A título de ejemplo: en Cataluña, al Nordeste de España (Figura 1), se ha detectado impacto por intrusión marina en las 14 masas de agua subterránea litorales que se han definido en las Cuencas Internas de Cataluña [en adelante, CIC], según Jordana *et al.* (2005). De hecho, 7 de

ellas se encuentran en riesgo moderado o alto de incumplimiento de los objetivos marcados por la Directiva Marco del Agua a causa de la intrusión marina. Es por ello que, para ser rigurosos, habría que referirse a medidas correctoras o recuperación más que a la mera gestión de los acuíferos costeros.

Las alternativas de gestión y de recuperación de acuíferos costeros son variadas. El Plan Hidrológico de las CIC contempla la realización de lo que denomina Plan de Ordenación de Extracciones [en adelante, POE] en los acuíferos principales, así como la definición de las normas de explotación de los mismos. Desde una perspectiva técnica, la redistribución de las extracciones es una medida teóricamente eficaz para minimizar los efectos de la intrusión marina, pero la experiencia dicta que no es fácilmente aplicable en la práctica y que no es la solución ideal, salvo

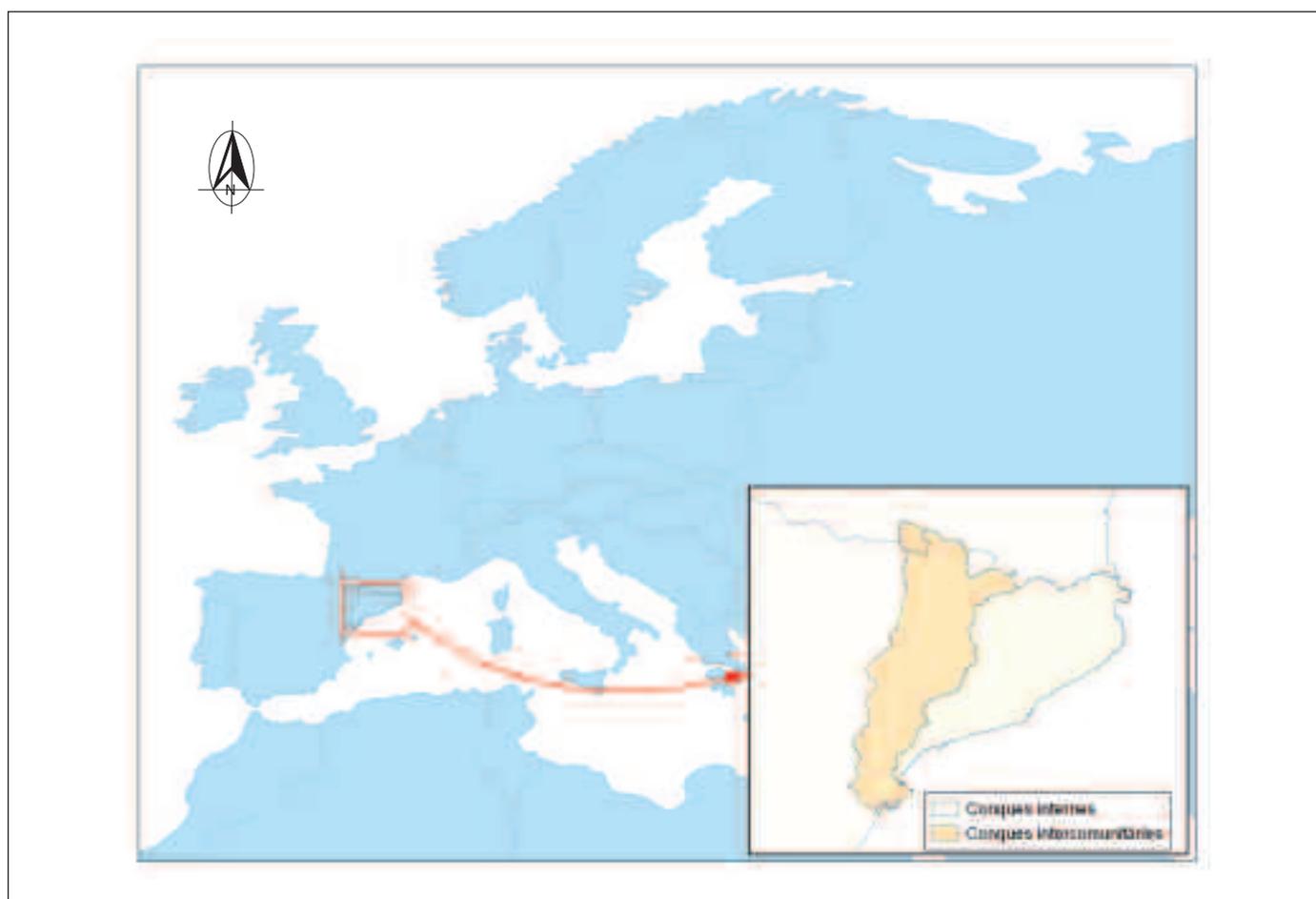


Figura 1. En Cataluña (Noreste de España), se diferencian la demarcación Hidrográfica de las cuencas internas de Cataluña (conques internes), CIC (mitad oriental) y las intercomunitarias (conques intercomunitarias); CI (mitad occidental)
Figure 1. Catalonia, Northeastern Spain, is divided in two halves from the hydrographic perspective. On the east, inner basins; on the west, shared basins with other regional and state authorities

falta de alternativas. Se descartan también en este artículo medidas alternativas como la reducción de las dotaciones urbanas y de riego: en términos absolutos, los ahorros conseguidos a nivel domiciliario pueden ser catalogados como pequeños, sin menospreciarlos por lo que suponen de contención y concienciación colectiva. Por su parte, actuaciones necesarias de modernización de los regadíos exigen de enfoques multi-sectoriales que no acostumbran a ser de fácil implantación, y, además, el uso agrícola no es el principal en las CIC. No se incluyen otras actuaciones de interés, como la construcción de barreras de contención o negativas.

A efectos del presente artículo, interesa distinguir entre las medidas basadas en la aportación de caudales superficiales de otras cuencas (trasvases) y las medidas correctoras que intentan explotar los recursos disponibles: superficiales, acuíferos, aguas depuradas y desalinización.

El presente artículo repasa la experiencia y perspectivas de recuperación de acuíferos afectados por

intrusión marina en Cataluña, haciendo énfasis en la tecnología de la recarga artificial de acuíferos o gestión de la recarga (Figura 2). Según Dillon (2005), la gestión de la recarga es una de las herramientas que pueden ser útil para afrontar la intrusión marina, pero no es la solución única a los problemas. Puede desempeñar un papel importante dentro de un paquete de medidas orientado a restaurar el equilibrio en el acuífero para asegurar y mejorar la calidad y cantidad de los abastecimientos en sintonía con la protección y restauración que, cada vez más, demanda la sociedad. Abarca *et al.* (2006) van más allá y afirman que una mera reducción de las extracciones no es suficiente para recuperar la calidad del acuífero, en referencia al Delta del Llobregat, y postulan que la inyección de agua en forma de barrera positiva es la única opción para lograrlo y, de paso, minimizar o evitar los cambios en los patrones de bombeo.

En este contexto, el artículo se divide en dos grandes bloques. En primer lugar, se resumen las actuaciones desarrolladas o en vías de desarrollo en tres

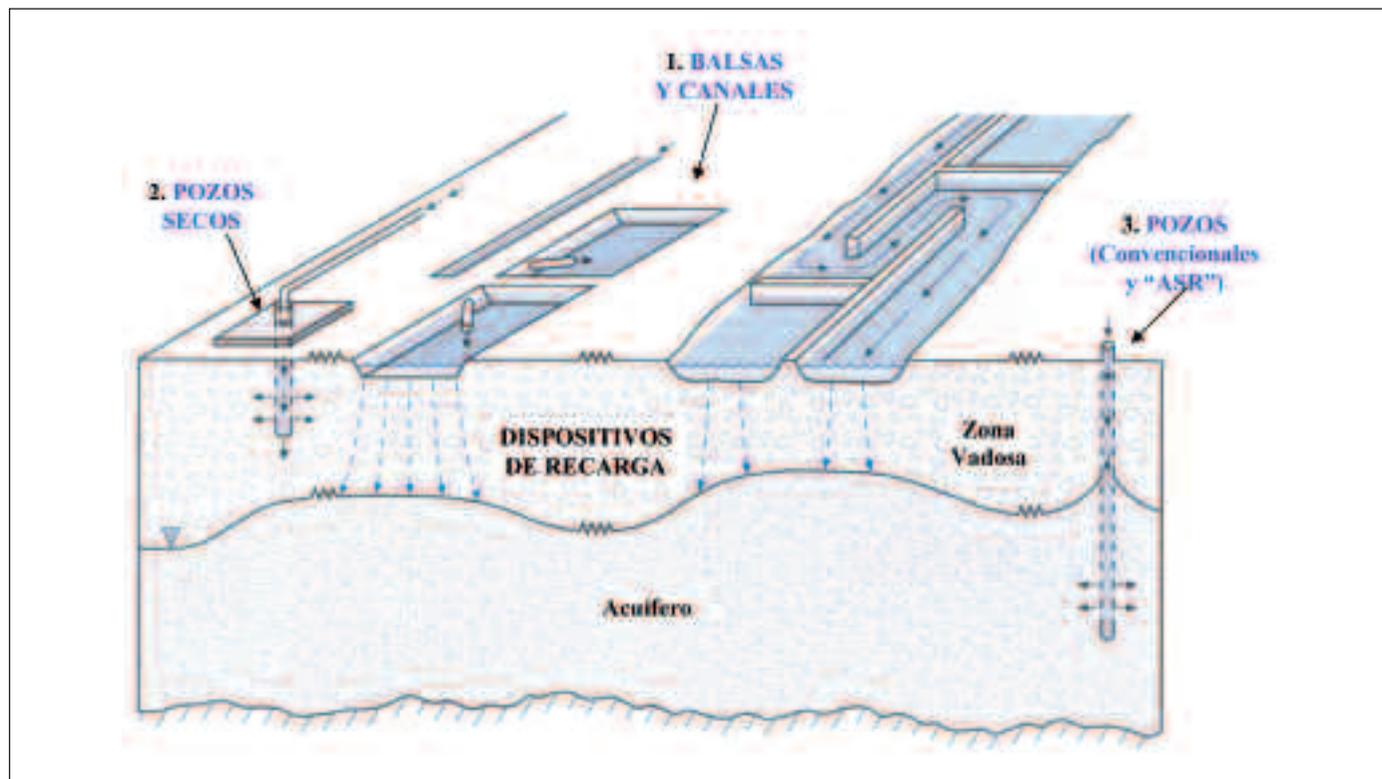


Figura 2. Esquemas de recarga artificial o gestión de la recarga. En esencia, hay dispositivos superficiales, como las balsas, y profundos, como los pozos. Se incluye un tipo intermedio, los pozos secos, que sólo son factibles cuando la zona no saturada tiene un espesor notable

Figure 2. Artificial recharge or managed aquifer recharge facilities: surface systems, such as basins, and deep systems, namely injection wells. Also, an intermediate scheme (dry wells) is showed, but they require high non-saturated thickness

acuíferos costeros catalanes, distinguiendo el enfoque adoptado en cada caso. En segundo lugar, se ofrece una actualización del estado del arte de la gestión de la recarga o recarga artificial, en general, poniendo de manifiesto los avances conseguidos y las dificultades a vencer para extender su aplicación. Concluye con unas reflexiones del autor sobre las maneras de abordar gestión y recuperación de los acuíferos costeros.

Medidas contra la intrusión marina en Cataluña

Cataluña posee una extensa línea de costa, en la que se concentran los principales asentamientos urbanos, especialmente el de Barcelona, con unos 4,5 millones de habitantes. Además, la industria turística intensifica la presión antrópica en la zona litoral. Y es aquí donde se hallan los principales acuíferos de las CIC, que ocupan aproximadamente la mitad oriental del territorio, con 16.600 km².

La coexistencia de una densa trama población permanente y estacional con acuíferos estratégicos da lugar a problemas de gestión por el mayor riesgo de deterioro de la calidad del agua subterránea o, según los criterios de la Directiva Marco del Agua, de su estado químico. Tal como se indica más arriba, 7 de las 14 masas de agua subterránea de las CIC están en riesgo moderado o alto de incumplimiento del buen estado en 2015, consecuencia de la explotación de los recursos subterráneos por encima de las aportaciones.

Para ilustrar esos problemas, se incluye en el siguiente apartado unas referencias a tres sistemas acuíferos costeros catalanes (Figura 3) en los que se han buscado formas diferentes de hacer frente a la intrusión marina. Por un lado, la clásica aportación de caudales externos al acuífero, como sucedió en el 'minitransvase' del Ebro al Camp de Tarragona (Francolí-Gaià). Por otro lado, las que pretenden un mejor aprovechamiento de los recursos locales, bien vía desalinización de agua marina (Delta del Tordera)

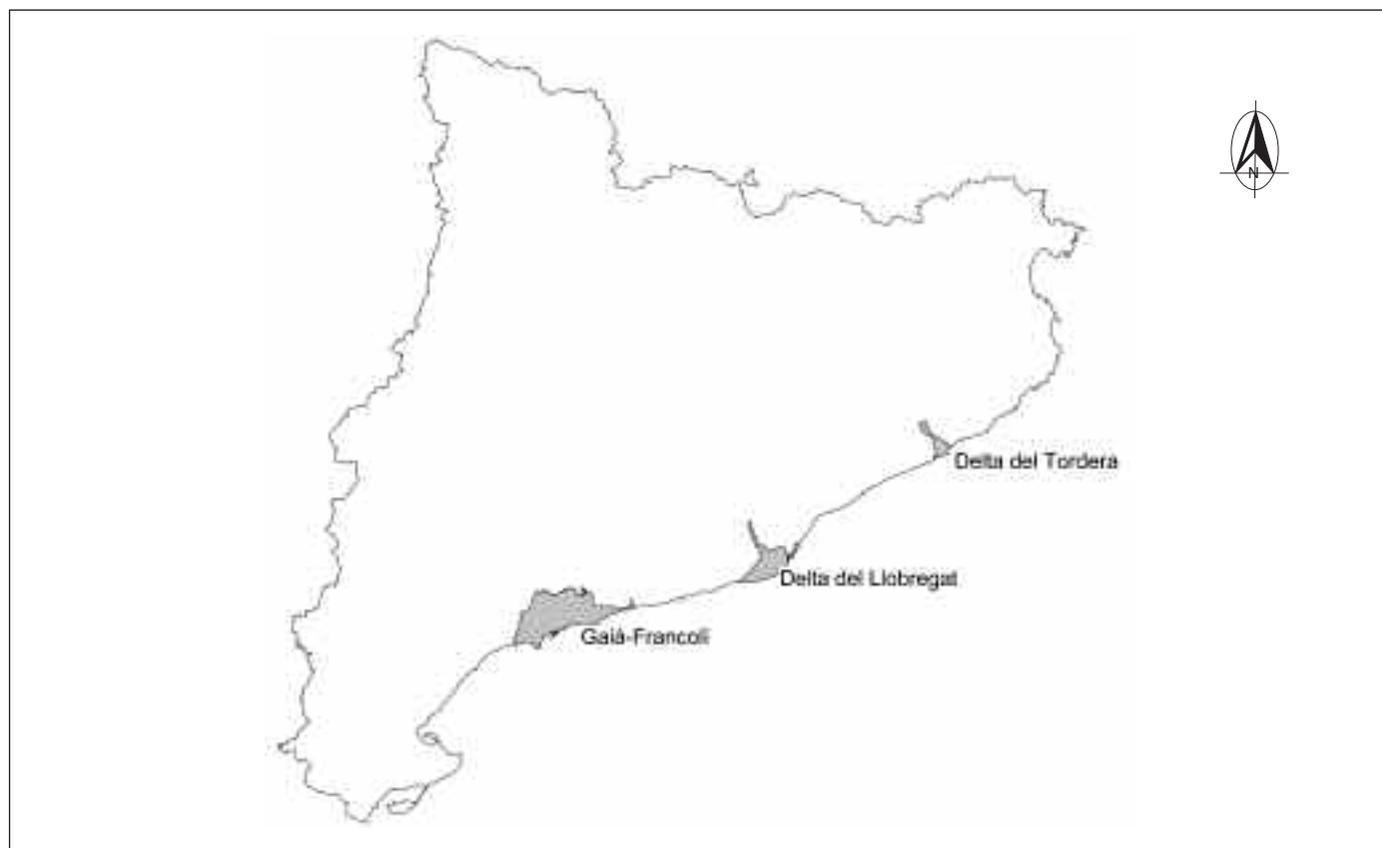


Figura 3. Mapa donde se muestran los acuíferos costeros a los que se refiere el presente artículo, según la delimitación contenida en el Decret 328/88, de 11 de octubre

Figure 3. Map showing the three coastal aquifers referred to in this article, according to the limits set by the Decret 328/88, in October 11th

o bien mediante la gestión de la recarga (Delta del Llobregat). En este último, además, el abanico de medidas correctoras en marcha incluye la construcción de una desalinizadora de agua marina.

Francolí-Gaià

En 1993, se aprobó un POE que incluía la declaración de sobreexplotación de determinados sectores de los acuíferos del Baix Francolí y del Bloc del Gaià, debido a la intrusión marina causada por un exceso de extracciones de agua subterránea respecto a los recursos disponibles. La situación ha cambiado tanto que, el 02/11/2006, se publicó en el Diario Oficial de la Generalitat de Catalunya [en adelante, DOGC] un segundo POE que ya no contiene una declaración de sobreexplotación de sector alguno, si bien impide aumentar las extracciones actuales en toda la franja costera y limita los posibles incrementos en otros sectores en función del uso del agua. Esta recuperación debe ser atribuida sin embargo al denominado 'minitransvase del Ebro', completado hacia 1990, con el que se distribuye en el área de influencia de Tarragona un caudal máximo de unos 4 m³/seg.

La demanda de agua en este ámbito presenta una marcada estacionalidad, con mínimos en invierno y máximos en verano. Aún reconociendo las dificultades que se plantean, la propuesta técnica de explotar el 'minitransvase' durante todo el año permitiría disponer de hasta 50,0 hm³/a para actuaciones de recarga de acuíferos, con el consiguiente beneficio en la gestión conjunta y aseguramiento de la garantía de suministro. Dicha propuesta no está en fase de proyecto o ejecución.

No obstante, el estado químico de los acuíferos ha empeorado con relación a los nitratos, con concentraciones superiores a 50 mg/L en amplias zonas (Torrás *et al.*, 2006). Es decir, la atenuación de la intrusión marina no implica una protección correcta de los acuíferos en otros aspectos.

Delta del Tordera

El 20/10/2003, se publicó en el DOGC el POE de los acuíferos del Tordera Medio y Delta del Tordera, el cual divide el ámbito de interés en una decena de polígonos de gestión. El POE declaró sobreexplotada la mayor parte del acuífero profundo del Delta porque las extracciones superaban ampliamente los recursos disponibles medios. Paralelamente, se inició la construcción de una desalinizadora de agua marina para producir unos 10,0 hm³/a de agua dulce. Una vez que

ésta ha entrado en funcionamiento, se ha constatado una recuperación substancial de los niveles piezométricos y la consiguiente reducción progresiva en la salinidad (Comino *et al.*, 2006).

Debe precisarse que la aportación de la desalinizadora no cubre todo el déficit calculado para conseguir la completa recuperación de los acuíferos del Delta del Tordera. Está prevista una ampliación de la planta para duplicar los caudales tratados, con lo que sí se estará en condiciones de afirmar la tendencia positiva actual e incluso disponer de agua de calidad para otros destinos. Curiosamente, la cuenca del río Tordera es el único ámbito en el que el Plan Hidrológico de las CIC vigente explicita la posibilidad de realizar recarga artificial, puesto que se recoge la opción de derivar un máximo de 30,0 hm³/a de la cuenca del río Ter para ese fin.

Delta del Llobregat

Tradicionalmente, se ha descrito el Delta del Llobregat como un acuífero bicapa. Esta visión es diferente a partir del nuevo modelo conceptual elaborado (Abarca *et al.*, 2006), donde se propone definir el clásico acuífero profundo como acuífero principal del Delta. Éste presenta un grado de intrusión marina notable, lo que ha llevado a la decisión de construir otra desalinizadora, en este caso de 60,0 hm³/a de producción útil. Pero la Agencia Catalana del Agua ha encargado la realización de diversos trabajos en los acuíferos con el fin de conseguir una mejora a medio plazo. Los resultados resumidos en el artículo de Abarca *et al.* (2006) son elocuentes: la Figura 4 compara la situación real con la que se obtendría en caso de optimizar las medidas correctoras, consistentes en la recarga de agua mediante balsas aguas arriba del Delta y la inyección en una barrera de pozos formada por 4 tramos, la cual se ubicaría atendiendo a criterios hidrogeológicos. El problema que se plantea es doble:

La restricción de no tener niveles piezométricos negativos tierra adentro no garantiza la recuperación real del acuífero principal del Delta, ya que está muy afectado por una intrusión marina (Figura 4a), y requeriría reducir los bombeos a la mitad en los dos polígonos con más extracción: la Vall Baixa y El Prat. Con la recarga de 11,0 hm³/a en balsas y de 3,7 hm³/a en la barrera, la reducción necesaria sería de un 25% de los bombeos en ambos polígonos, partiendo de la extracción total estimada en 2001 entre el Congost de Martorell y el mar (64,0 hm³/a). Actualmente, la extracción es del orden de 50,0-55,0 hm³/a en total, un 15-20% inferior a la de 2001. Esto puede permitir una

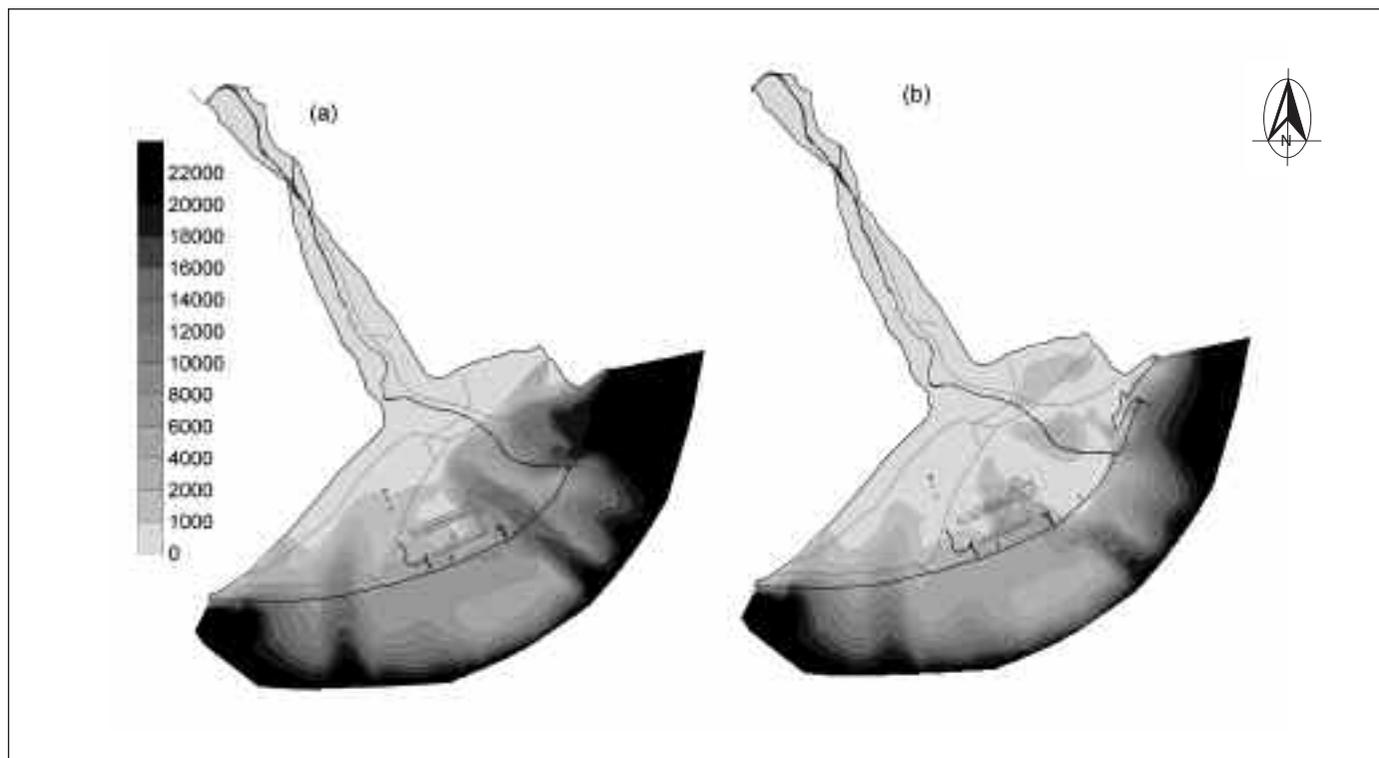


Figura 4. Mapas de isocloruros en el acuífero de la Vall Baixa y en el acuífero principal del Delta del Llobregat: (a) la situación real a finales de 2004; (b) situación optimizada, hipotética, tras la ejecución de balsas de recarga y la barrera o pozos de inyección. Resultados del modelo encargado por la Agencia Catalana del Agua. Fuente: Abarca *et al.* (2006)

Figure 4. Isochloride map corresponding to the Vall Baixa and the main Llobregat's Delta aquifers: (a) actual concentrations so as to 2004, December; (b) optimised situation, hypothetical, after constructing both recharge basins and injection wells (barrier). Results from the numerical model made for the Catalan Agency of Water. Source: Abarca *et al.* (2006)

solución de compromiso que satisfaga los requisitos medioambientales y los derechos de los usuarios, bajo las condiciones que se establezca en el instrumento de gestión (POE mejorado) en elaboración conjunta por la Agencia Catalana del Agua y la Comunidad de Usuarios del Delta del río Llobregat [en adelante, CUADLL].

La combinación de balsas y barreras se revela como la única forma de proceder al lavado de las sales acumuladas en el acuífero durante décadas y, por tanto, como solución necesaria para su recuperación. Esto último no es en sí mismo un problema, ya que en Marzo de 2007 comenzarán las pruebas de la primera fase de la barrera, que supone la inyección de 5.000 m³/d (1,8 hm³/a) en el acuífero principal del Delta, tal como se comenta a continuación. El problema es que una recuperación ni siquiera completa (Figura 4b) del buen estado químico demanda incrementar las dimensiones de las balsas y pozos de inyección si se pretende aumentar las extracciones actuales o incluso sólo mantenerlas en los polígonos más presionados.

Como se indica, la barrera positiva de pozos no es una propuesta teórica sino real. En marzo de 2007, está previsto iniciar las pruebas de la 1ª fase con los 4 pozos de inyección construidos cerca de la margen izquierda del río desviado (derecha del antiguo cauce). Los ensayos tienen una duración prevista de un año, período durante el cual se pretende estudiar la respuesta de los pozos y del acuífero a la recarga de diferentes composiciones del agua, asunto que será estudiado. En un principio, se planteó que el agua procediera en un 50% de la red (potable) y en otro 50% de la depuradora de DepurBaix, sometiendo a ésta a un tratamiento intensísimo: secundario biológico, mezcla, coagulación-floculación, filtración, desinfección, microfiltración, ósmosis inversa y poscloración (Cazurra *et al.*, 2004; Compte y Cazurra, www.depurbaix.com). No está clara cuál es la justificación para este planteamiento, pero, como se verá en el apartado dedicado a la gestión de la recarga, parece haber un exceso de precaución sin base técnica aparente. Podría deberse a una postura defensiva ante un (eventual, no demostrado) rechazo social o

de ciertos usuarios, puesto que el acuífero principal del Delta del Llobregat es explotado intensamente para abastecimiento de población.

Otra cuestión a examen actualmente es la disposición de los pozos de la 2ª fase y los volúmenes a inyectar, que originariamente mantenían la relación 50-50 (agua potable-depurada altamente tratada) y caudales de unos 15.000 m³/d (5,5 hm³/a). La Agencia Catalana del Agua está valorando alternativas para buscar la mayor eficiencia posible. Disponer de un modelo numérico robusto es esencial para establecer comparativas y escenarios de gestión. La CUADLL desarrolla un papel protagonista en esta valoración.

Sobre la gestión de la recarga (recarga artificial)

Visión general

El término 'gestión de la recarga' ha sido acuñado en substitución del clásico 'recarga artificial de acuíferos' por razones semánticas, dado que 'artificial' parece tener connotaciones poco favorables. El nuevo término, cuyo acrónimo en inglés es MAR, de *management of aquifer recharge* (Dillon, 2005), describe el almacenamiento y tratamiento de agua en un acuífero de forma intencionada. Ya lo había definido así Custodio (1986), al insistir en dos cuestiones esenciales de la recarga artificial: la intencionalidad y la finalidad de la recarga.

Las instalaciones de recarga artificial acumulan décadas de experiencia en todo el mundo, incluyendo a España (Custodio *et al.*, 1982; Murillo, 1996; Pérez-Paricio y Carrera, 1999; Fernández Escalante *et al.*, 2005a). Hoy en día, puede afirmarse que hay un conocimiento suficiente para afrontar con garantías cualquier nuevo proyecto de recarga. Existen referencias y guías básicas, que tratan temas variados. Para diseño de instalaciones, en general, la ASCE (2001) elaboró unas recomendaciones de partida; para balsas de recarga, interesa el artículo de Bouwer (2002), entre otros; si se necesita información sobre pozos de recarga, Pyne (2005) ofrece un tratado detallado; para cuestiones sobre colmatación de los dispositivos de recarga, el manual elaborado por Pérez-Paricio y Carrera (1999) para un proyecto europeo sobre la materia.

Aspectos técnicos en las actuaciones de recarga

Numerosos trabajos focalizan en la atenuación dentro del acuífero de sustancias aportadas por el agua

de recarga o que pueden generarse con el tiempo, así como de microorganismos patógenos. Su atenuación viene controlada por procesos físicos, químicos y biológicos; entre los factores analizados, destacan la temperatura (Massmann *et al.*, 2006), el grado de saturación (Greskowiak *et al.*, 2005) o el estado redox del agua (Prommer y Stuyfzand, 2005). Estos estudios consideran tanto instalaciones de recarga en superficie (Chittaranjan, 2002) como pozos de inyección (SJRWMD y Pyne, 2004; Dillon y Toze, 2005).

Entre los compuestos químicos estudiados, destacan la materia orgánica disuelta en aguas depuradas inyectadas en pozos (Vanderzalm *et al.*, 2006), los elementos orgánicos traza (Grünheid *et al.*, 2005), los herbicidas (Broholm *et al.*, 2001) y los derivados farmacéuticos activos (Derksen *et al.*, 2004). También, hay lugar para los subproductos de la desinfección (Pavelic *et al.*, 2006a), de gran interés en pozos duales de recarga/extracción.

También hay abundancia de estudios sobre la evolución de patógenos en el acuífero. Schijven *et al.* (2000) midieron la respuesta de los microorganismos a la inyección en pozos profundos. Maxwell *et al.* (2003) evaluó el transporte de los virus a largo plazo en la recarga operada en Orange County, California (EUA), trabajo que hace patente la necesidad de mejora en diversos campos: modelación del transporte de los virus, redes de control y métodos de caracterización más fiables, e integración en un marco regulador adecuado para la gestión de acuíferos.

Otra cuestión, superable si se sigue unas pautas metódicas, es la colmatación de los dispositivos de recarga (Pérez-Paricio, 2001). Pero la cuestión principal es la durabilidad (sostenibilidad) de la recarga y el control de los contaminantes químicos y microbiológicos. Hay más sensibilidad cuando se recurre a aguas no convencionales, si bien los estudios publicados son favorables, tanto a la recarga de aguas depuradas (Dillon *et al.*, 2006) como en el caso del agua de escorrentía de tormenta (Pavelic *et al.*, 2006b). En el acuífero de Hueco-Bolson, en Texas (EUA), se ha inyectado 75,0 hm³ de aguas depuradas en 10 pozos durante 18 años (Sheng, 2005).

Heberer (2002) detectó concentraciones del orden del µg/L de compuestos farmacéuticamente activos –ácido clofíbrico, diclofenaco, ibuprofeno, propifenzona, primidona, carbamazepina– tanto en el influente como en el efluente de plantas depuradoras urbanas de Berlín, entre 1996 y 2000. Más aún, concentraciones individuales de hasta 7,3 µg/L en muestras de agua subterránea. E, incluso, presencia de derivados farmacéuticos, en valores también del orden de µg/L, en muestras de agua potable de

Berlín. El interés por estas cuestiones en Alemania es enorme por el peso de la recarga en el abastecimiento domiciliario, básicamente mediante el bombeo en acuíferos someros, bien conectados con cursos fluviales sometidos a elevadas cargas de aguas depuradas (recarga inducida, *bank filtration* en inglés). Massmann *et al.* (2004) indican que, en Berlín, el 70% del agua de boca deriva de la recarga inducida. Las lecciones obtenidas en Alemania podrían ser muy útiles en los países secos de la Europa meridional, en los que los caudales base de los ríos son bajos y los vertidos de las depuradoras representan un porcentaje alto, si no único en los estíos: es lo que se llama sistemas semi-cerrados.

Otros autores relativizan los riesgos para la salud presuntamente asociados a la recarga con aguas depuradas. Toze (2006) titula elocuentemente su artículo "*Reutilización y riesgos sanitarios – reales frente a percibidos*", en el que analiza los riesgos reales de la reutilización en cuanto al riesgo sanitario y al impacto medioambiental: compuestos químicos prioritarios y patógenos microbianos. Concluye que son estos últimos los que plantean un mayor riesgo, y reconoce que puede haber incertidumbre respecto a la efectividad de los procesos naturales en la reducción de la supervivencia de los patógenos. Para que la reutilización llegue a ser una parte valiosa del ciclo integral del agua, en los ámbitos rural y urbano, falta definir [1] tratamientos económicamente viables, [2] un marco regulador 'sensible' y [3] mejores valoraciones del riesgo sanitario y de la gestión. Esto es de gran interés para la gestión de la recarga, que deberá tender al uso de recursos no convencionales de forma creciente.

Aspectos sociales en las actuaciones de recarga

Las instalaciones de gestión de la recarga con aguas superficiales no suelen encontrar oposición social, aunque puede haber reticencias si se teme por la repercusión de la detracción de caudales en los cauces naturales (Fernández Escalante *et al.*, 2005b).

El apoyo público es crucial para la implantación de la reutilización, y, por ende, de esquemas de gestión de la recarga basados en aguas depuradas. Friedler y Lahav (2006) resumen los resultados de un cuestionario efectuado en Israel para determinar la actitud de la ciudadanía en Israel con respecto a algunas opciones de reutilización, que muestra un enorme apoyo si son de bajo contacto y menos unanimidad para usos que puedan suponer un mayor contacto. Concluyen que se debe generar una opinión pública

positiva hacia la reutilización a partir de campañas que expliquen las tecnologías de tratamiento, los aspectos sanitarios y su impacto económico positivo. Hacen falta iniciativas similares en España que favorezcan la implantación de una verdadera nueva cultura del agua, en la que todos los recursos hídricos sean gestionados y planificados integradamente, de acuerdo con las restricciones ambientales que la sociedad considere necesarias y en armonía con el desarrollo socio-económico. Fernández Escalante y Cordero (2006) formulan una estrategia para acercar la recarga artificial de acuíferos a la población mediante la educación ambiental, uno de los déficit en la gestión del agua en España.

Conclusiones

El deterioro de importantes acuíferos costeros por intrusión marina, en algunos casos durante décadas, obliga a plantear medidas correctoras de recuperación más que a hablar de su gestión. En Cataluña, la mitad de las masas de agua subterráneas costeras presentan un riesgo moderado o alto de incumplimiento de los objetivos comunitarios.

Las formas de atajar la intrusión marina son variadas. Tradicionalmente, ha consistido en transferir agua de otras cuencas, supuestamente excedentarias. El Camp de Tarragona se suministra del 'minitransvase' del Ebro (4 m³/s) desde 1990, actuación que dio lugar a una reducción de las extracciones del sistema acuífero y a una mejora de la intrusión marina. Pero no ha mejorado el estado químico global de los acuíferos porque se ha registrado un incremento muy notable de las concentraciones de nitratos en el agua subterránea. Garantizar el agua de boca es esencial; también lo es atender los compromisos que dimanar de la Directiva Marco del Agua.

Existen otras soluciones con menor recorrido histórico pero gran potencialidad presente y futura en un contexto de cada vez mayor precariedad de recursos hídricos. En el Delta del Tordera, se construyó una desalinizadora de agua marina que aporta hasta 10,0 hm³/a desde finales de 2002, causando una reducción equivalente de los bombeos y una mejora de la intrusión marina. Está en marcha una ampliación de esta instalación para duplicar los volúmenes tratados y conseguir así una mejora (esperemos) definitiva para toda su área de influencia.

En el Delta del Llobregat, también está proyectada una desalinizadora que aportará hasta 60,0 hm³/a de agua dulce. Esto debería acarrear una reducción de las extracciones, pero la existencia de una comunidad de usuarios potente (CUADLL) que busca preservar

sus derechos concesionales hace presumir que la realidad será diferente. Además, los trabajos encargados por la Agencia Catalana del Agua ponen de manifiesto que una reducción de las extracciones de los 64,0 hm³/a de 2001 (entre 50,0-55,0 hm³/a hoy día) hasta los 35,0 hm³/a simulados no garantizaría la recuperación real del acuífero principal del Delta. Son necesarias instalaciones de recarga mediante balsas y barreras de pozos para recuperar el estado químico. Para lograrlo, haría falta reducir las extracciones del año 2001 en un 25% en los dos polígonos de mayor explotación aún si se acaban ejecutando todas las instalaciones de recarga previstas (11,0 hm³/a en balsas, 3,7 hm³/a en pozos). Aunque no es una relación proporcional, la reducción experimentada en las extracciones por la deslocalización de industrias y otras razones ya es del orden del 15-20%, lo cual apunta a que podría conseguirse un buen resultado final con un esfuerzo asumible. La optimización numérica indica que harían falta 16,5 hm³/a a través de balsas y 11,3 hm³/a en pozos para poder mantener los 64,0 hm³/a de bombeo del 2001. Estos números son de gran utilidad porque, correctamente analizados, permiten huir de cualquier demagogia y sentar las bases de una recuperación del estado químico de los acuíferos.

Es posible que la recarga artificial de acuíferos plantee dudas en grupos de opinión sobre su viabilidad sanitaria y medioambiental, sobre todo si se realiza mediante pozos. Entre otras: movilización de compuestos existentes de forma natural en los acuíferos, generación de subproductos de la desinfección, contaminación por patógenos, mezcla con aguas de superior o inferior calidad, en función de las condiciones iniciales en el acuífero destinatario de la inyección. La reutilización de aguas depuradas vía recarga de acuíferos muestra un gran potencial que no ha de verse limitado por una falta de pedagogía y educación social.

En relación a estos puntos, conviene hacer las consideraciones siguientes:

- La bibliografía científica rebate con datos algunas de las preocupaciones apuntadas. En general, los potenciales contaminantes o bien se atenúan en su paso por el subsuelo o bien alcanzan concentraciones muy bajas en el agua recuperada, tanto por la sucesión de ambientes oxidantes y reductores dentro del acuífero como por la posibilidad de incidir en su control mediante una operación adecuada de la instalación de recarga.
- El riesgo principal podría estar ligado a los patógenos (en particular, los virus), sobre todo si se recarga agua depurada, pese a la falta de pruebas que lo confirmen: no tiene sentido ser

mucho más exigente con la recarga de acuíferos que, por ejemplo, con los vertidos de las depuradoras. No debe olvidarse el poder atenuante del conjunto suelo-acuífero y el hecho de que los sistemas hídricos son en muchas ocasiones semi-cerrados, en el sentido de que ya se detectan determinados compuestos químicos incluso en el agua superficial y en la de boca. En Cataluña, se ha optado por evaluar los riesgos caso por caso para la recarga de acuíferos, sin fijar condiciones desorbitadas a priori que pueden revelarse innecesarias ni pretender alcanzar la utopía del riesgo nulo (http://mediambient.gencat.net/aca/documents/ca/planificacio/criteris_tecnicos/criteris_reutilizacio_aignes_regenerades.pdf).

- Sigue faltando una planificación a medio y largo plazo de la recarga. La experiencia en otros países es sin duda fundamental, pero la recarga de acuíferos tiene una componente empírica ineludible, y eso debe ser entendido por las autoridades responsables de la planificación. El objetivo sería extraer conclusiones aplicables en nuestras latitudes, con rigor y sin exceso de celo.
- La gestión de la recarga de acuíferos puede ser la única forma realista de recuperar acuíferos contaminados por intrusión salina, por la necesidad de desplazar la carga salina y eliminarla por mezcla (bombeos) o salidas naturales. En regiones áridas, la principal preocupación es garantizar la cantidad, la disponibilidad; pero esto no es posible en acuíferos costeros si no se atiende a los indicadores de calidad.
- No es admisible que se utilice una presunta reticencia social a la reutilización y a la recarga de acuíferos como argumento para imponer soluciones más costosas económica y ambientalmente. En todo caso, correspondería a los organismos de investigación y de la Administración el divulgar las ventajas e inconvenientes de estas tecnologías, de gran importancia junto con la desalinización.
- Pese a las valoraciones desfavorables de quienes no conocen la tecnología de la recarga de acuíferos, la eficiencia hidráulica de una barrera de inyección como la propuesta para el Delta del Llobregat es superior al 100%, puesto que el flujo hacia el mar del agua inyectada representa una pérdida inferior a la ganancia neta obtenida por la protección lograda para los bombeos existentes tierra adentro. Y puede ser la única forma de recuperar acuíferos costeros gravemente contaminados por intrusión marina.

Referencias

- Abarca, E., Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., Capino, B., Gámez, D. y Batlle, F., 2006. Optimal design of measures to correct seawater intrusion. *Water Resources Research*, 42, W09415, doi:10.1029/2005WR004524, 14 pp.
- ASCE – American Society of Civil Engineers, 2001. *Standard Guidelines for Artificial Recharge of Ground Water*. Reston, Virginia (EUA), 106 pp.
- Bouwer, H., 2002. Artificial recharge of groundwater: hydrology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10, 121-142.
- Broholm, M.M., Rügge, K., Tuxen, N., Højberg, A.L., Mosbæk, H. Y Bjerg, P.L., 2001. Fate of herbicides in a shallow aerobic aquifer: A continuous field injection experiment (Vejen, Denmark). *Water Resources Research*, 37 (12), 3163-3176.
- Cazurra, T., Payá Pérez, A., Méndez Iglesias, D., Reig, B. y Adell, A., 2004. Proyecto constructivo de las instalaciones contra la intrusión salina en el acuífero del Baix Llobregat (primera fase). *Tecnoambiente*, 15-21.
- Chittaranjan, R., 2002. *Riverbank filtration: understanding contaminant biogeochemistry and pathogen removal*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht y Boston, 268 pp.
- Comino, D., Pérez-Paricio, A., Guiteras, N. y Carmona, I., 2006. La incorporación de sistemas de información geográfica en la gestión sostenible del agua subterránea: el SIG integrado de La Tordera. *Jornadas sobre las aguas subterráneas en la gestión integrada de los recursos hídricos*, Barcelona.
- Compte, J. y Cazurra, T. *La reutilización de las aguas residuales del Baix Llobregat*. www.depurbaix.com
- Custodio, E., 1986. Recarga artificial de acuíferos. *Boletín de Informaciones y Estudios*, nº 45. Servicio Geológico, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid (España). 148 pp.
- Custodio, E., Isamat, J. y Miralles, J., 1982. Twenty-five years of groundwater recharge in Barcelona (Spain). DVWK Bulletin 11, *Artificial Groundwater Recharge*. Verlag Paul Parey, Hamburg/Berlin, I: 171-192.
- Derksen, J.G.M., Rijs, G.B.J. Y Jongbloed, R.H., 2004. Diffuse pollution of surface water by pharmaceutical products. *Water Science and Technology*, 49 (3), 213-221.
- Dillon, P.J. 2005. Future management of aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 13, 313-316.
- Dillon, P.J., y Toze, S., 2005. *Water quality improvements during Aquifer Storage and Recovery*. American Water Works Association Research Foundation, Denver (Colorado, EUA). Report 91056F, 286 pp + 2 CDs.
- Dillon, P.J., Pavelic, P., Toze, S., Rinck-Pfeiffer, S., Martin, R., Knapp, A. y Pidsley, D., 2006. Role of aquifer storage in water reuse. *Desalination*, 188 (1-3), 123-134.
- Fernández Escalante, A.E., García Rodríguez, M. y Villaroya, F. 2005a. Inventario de experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo. *Tecnología@ y Desarrollo, Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*. Vol. III, Marzo de 2005, 24 pp. http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECEOC05_001.pdf
- Fernández Escalante, A.E., García Rodríguez, M., Villaroya, F. y Montero, J. 2005b. Propuesta de un sistema de indicadores medioambientales para la evaluación de impacto ambiental y seguimiento de actividades de regeneración hídrica mediante recarga artificial de acuíferos (Primera parte: estado-presión). *Tecnología@ y Desarrollo, Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*. Vol. III, Noviembre de 2005, 44 pp. http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECEOC05_004.pdf
- Fernández Escalante, A.E., y Cordero Sánchez, R., 2006. Esbozo de una estrategia para acercar la recarga artificial de acuíferos a la población mediante la educación ambiental. *Ecosistemas*, 2006/1 (<http://www.revistaecosistemas.net/pdfs/376.pdf>).
- Friedler, E. y Lahav, O., 2006. Centralised urban wastewater reuse: what is the public attitude? *Water Science & Technology*, 54 (6-7), 423-430.
- Greskowiak, J., Prommer, H., Massmann, G., Johnston, C.D., Nützmann, G. y Pekdeger, A., 2005. The impact of variably saturated conditions on hydrogeochemical changes during artificial recharge of groundwater. *Applied Geochemistry*, 20 (7), 1409-1426.
- Grünheid, S., Amy, G. y Jekel, M., 2005. Removal of bulk dissolved organic carbon (DOC) and trace organic compounds by bank filtration and artificial recharge. *Water Research*, 39 (14), 3219-3228.
- Heberer, T., 2002. Tracking pharmaceutical residues from municipal sewage to drinking water. *Journal of Hydrology*, 266 (3-4), 175-189.
- Jordana, S., Vilanova, E., Guimerà, J., Niñerola, J.M. e Ibáñez, X., 2005. Sistemática empleada para la evaluación del riesgo de incumplimiento de objetivos medioambientales de la directiva marco del agua. Masas de agua subterránea de las Cuencas Internas de Cataluña. *Jornadas Internacionales: De la toma de datos y la realización de modelos de agua subterránea a la gestión integrada*. Alicante, AIH-GE.
- Massmann, G., Knappe, A. y Pekdeger, A., 2004. Investigating the influence of treated sewage in ground and surface water using wastewater indicators in Berlin, Germany. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*, 32 (4-5), 336-350.
- Massmann, G., Greskowiak, J., Dünnebier, U., Zuehlke, S., Knappe, A. y Pekdeger, P., 2006. The impact of variable temperatures on the redox conditions and the behaviour of pharmaceutical residues during artificial recharge. *Journal of Hydrology*, 328 (1-2), 141-156.
- Maxwell, R. M., Welty, C., Thompson, A. F.B., 2003. Streamline-based simulation of virus transport resulting from long term artificial recharge in a heterogeneous aquifer. *Advances in Water Resources*, 26 (10), 1075-1096.
- Murillo, J.M., 1996. Planes y proyectos del ITGE sobre recarga de acuíferos con aguas residuales. Experiencias desarrolladas hasta el presente. *Jornadas Técnicas XXX Aniversario del Curso Internacional de Hidrología Subterránea*, Barcelona.
- Murillo, J.M., 2005. Los modelos de uso conjunto en la recuperación medioambiental de los sistemas hídricos.

Jornadas Internacionales: De la toma de datos y la realización de modelos de agua subterránea a la gestión integrada. Alicante, AIH-GE.

- Pavelic, P., Dillon, P.J. y Nicholson, B.C., 2006a. Comparative evaluation of the fate and disinfection byproducts at eight aquifer storage and recovery sites. *Environmental Science & Technology*, 40, 501-508.
- Pavelic, P., Dillon, P.J., Barry, K.E. y Gerges, N.Z. 2006b. Hydraulic evaluation of aquifer storage and recovery (ASR) with urban stormwater in a brackish limestone aquifer. *Hydrogeology Journal*, 14, 1544-1555.
- Pérez-Paricio, A. y Carrera, J., 1999. *Clogging Handbook. EU Project on artificial recharge of groundwater*. Contrato ENV4-CT95-0071. No publicado, archivo en formato PDF. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Pérez-Paricio, A., 2001. *Integrated modelling of clogging processes in artificial groundwater recharge*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Publicada en Internet, con ISBN 84-699-5521-7. Dirección: <http://www.tdx.cesca.es/TDX-0629101-083346/>
- Prommer, H., y Stuyfzand, P.J. 2005. Identification of temperature-dependent water quality changes during a deep well injection experiment in a pyritic aquifer. *Environmental Science and Technology*, 39 (7), 2200-2209.
- SJRWMD y Pyne, R.D.G. 2004. *Aquifer Storage and Recovery (ASR) Issues and Concepts*. Artículo elaborado por the St. Johns River Water Management District en asociación con R.D.G. Pyne. Septiembre de 2004, 34 pp.
- Pyne, R.D.G., 2005. *Aquifer storage recovery: a guide to groundwater recharge through wells*. Second edition. Lewis Publishers. 620 pp.
- Schijven, J.F., Medema, G., Vogelaar, A.J. y Hassanizadeh, S.M., 2000. Removal of microorganisms by deep well injection. *Journal of Contaminant Hydrology*, 44 (3-4), 301-327.
- Sheng Z., 2005. An aquifer storage and recovery system with reclaimed wastewater to preserve native groundwater resources in El Paso, Texas. *Journal of Environmental Management*, 75 (4), 367-377.
- Torras, B., Puigserver, D. y Pérez-Paricio, A., 2006. Gestió de les aigües subterrànies al Camp de Tarragona. Elaboració i aplicació d'un Pla d'Ordenació d'Extraccions. *Jornadas sobre las aguas subterráneas en la gestión integrada de los recursos hídricos*, Barcelona.
- Toze, S., 2006. Water reuse and health risks – real .vs. perceived. *Desalination*, 187, 41-51.
- Vanderzalm, J.L., Le Gal La Salle, C. y Dillon, P.J., 2006. Fate of organic matter during aquifer storage and recovery (ASR) of reclaimed water in a carbonate aquifer. *Applied Geochemistry*, 21, 1204-1215.

Recibido: diciembre 2006

Aceptado: abril 2007