

Gestión de la recarga artificial de acuíferos como práctica alternativa de gestión hídrica. El proyecto DINA-MAR

Autor principal: Enrique Fernández Escalante

Institución: Grupo TRAGSA
Teléfono: 913226106
E-mail: efe@tragsatec.es

Otros autores:

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	3
2	OBJETIVOS	4
3	MATERIALES Y MÉTODOS	4
4	ESTADO DE LA CUESTIÓN	5
4.1	- GRADO DE IMPLANTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA A NIVEL EUROPEO Y NACIONAL	5
5	DISCUSIÓN	10
5.1	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS (AR O MAR).....	14
5.2	DIMENSIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LA TÉCNICA MAR.....	17
6	RESULTADOS PRELIMINARES.....	22
7	CONCLUSIONES.....	24
8	AGRADECIMIENTOS	25
9	BIBLIOGRAFÍA	26

RESUMEN

La gestión de la recarga artificial de acuíferos (*Managed Aquifer Recharge* o *MAR*) es considerada una técnica “especial” o “alternativa” junto con la desalación y la reutilización. Se ha hecho un inventario de experiencias a nivel mundial, concluyendo en que esta técnica se encuentra infrautilizada en el estado español, a pesar de encajar con los requerimientos hídricos y el marco legal actuales.

En nuestro país la mayoría de las experiencias tienen un carácter experimental. Según nuestros cálculos, el volumen de agua recargada de modo artificial es unas 10 veces inferior al de otros países centroeuropeos.

Con objeto de conocer el potencial y alcance de esta técnica, el Grupo Tragsa ha iniciado el proyecto DINA-MAR, con objeto de determinar los acuíferos de España susceptibles para la recarga artificial. El programa, tras conocer el “estado del arte” a nivel mundial, ha desarrollado un proceso de cálculo, apoyado en una fuerte componente GIS, para determinar mediante análisis vectorial aquellos acuíferos más proclives para aplicar procesos MAR. Para ello se tienen en consideración más de 30 parámetros (p.e. regadío con aguas subterráneas, cercanía a cauces fluviales, datos foronómicos, hidrológicos, climáticos, mapas hidrogeológicos, masas forestales, y un largo etcétera que incluye circunstancias socio-económicas y la procedencia política de cada actividad).

Conocidas las zonas susceptibles, se determina el dispositivo más idóneos para alcanzar la máxima efectividad, en principio basándose en la técnica de escenarios análogos y adoptando unas “zonas piloto” en distintos tipos de acuíferos para realizar experimentos controlados de la eficiencia de los distintos dispositivos (superficiales, profundos, etc.).

Las actividades tienen un proceso de detección de impactos ambientales, bajo la máxima de planificar las actuaciones en el marco del desarrollo sostenible y en una adecuada política medioambiental, con especial consideración a los caudales ecológicos de los cauces fluviales de toma. Para ello se han diseñado indicadores medioambientales y se está estudiando cómo regenerar humedales degradados mediante operaciones MAR.

El proyecto DINA-MAR prevé una fase de desarrollo tecnológico para el diseño e implementación de dispositivos específicos, que permitan alcanzar unas tasas de infiltración altas, estudiar técnicas de tratamiento de suelo y acuífero (SAT), nuevos materiales y energías alternativas, tanto para la alimentación de los dispositivos como para la producción de energía eléctrica a pequeña escala.

El programa cuenta con un programa de educación ambiental y divulgación simultáneo con una fuerte carga de innovación.

PALABRAS CLAVE: hidrogeología, recarga artificial de acuíferos, *Managed Aquifer Recharge* (MAR), DINA-MAR, gestión hídrica, gestión conjunta, humedales.

1 INTRODUCCIÓN

La realidad hídrica española de comienzos del siglo XXI se perfila, para gran parte de los técnicos involucrados en la gestión hídrica y para gran parte de la población, como una situación delicada, en la que un recurso tan valioso como es el agua es sometido a serias amenazas. Este hecho introduce un grado de incertidumbre en el suministro del futuro, tanto en cantidad como en calidad, lo que colisiona directamente con los principios de la sostenibilidad.

España ha alcanzado la madurez hídrica en la década de los 90 (su demanda total ha sobrepasado la mitad de sus recursos), y aparentemente mantiene su tendencia general del último siglo en cuanto a la gestión hídrica, apoyada en una filosofía y una ética tendente hacia unos principios de unificación, coordinación, desarrollo sostenible, respeto a los recursos naturales, y, en definitiva, “buen estado de las aguas”.

De acuerdo con “nuestro futuro común”, la gestión hídrica del país encara serias dificultades, como son los periodos de sequía concurrentes, la sobreexplotación de acuíferos, la intrusión marina en varias zonas del litoral, la contaminación de masas de agua, el permanente “hidrocidio” (Llamas, 2000 y 2001) de aguas potables, cuyo resultado no siempre termina en depuradoras, etc. A estos problemas hay que añadir otros de naturaleza más global, como es el avance de la desertización, el cambio climático, etc.

Ante problemas nuevos, los gestores hídricos se han visto obligados a introducir nuevos esquemas en sus diseños de utilización conjunta, surgiendo técnicas novedosas que se han ido haciendo un hueco en la idiosincrasia del país, tales como la desalación, con los grandes rechazos de sal que esta técnica está generando, la reutilización y, en este contexto, la recarga artificial de acuíferos, técnica considerada “especial” (PHD, 1996) y moderna, aunque en realidad no es nueva, al haber experiencias en España al menos desde el siglo XIII (Díaz Marta, 1989 y Fdez. Escalante et al, 2006).

En este contexto, la recarga artificial de acuíferos (AR)¹ o gestión de la recarga de acuíferos (MAR) se perfila como una técnica alternativa, complementaria y de gran futuro, en vista de sus bajos costes con respecto a otras técnicas y por contar con una amplia dimensión medioambiental. Esta técnica ha tenido, hasta la fecha, una escasa consideración por parte de los gestores hídricos del país, más centrados en el empleo de recursos hídricos superficiales.

El artículo aquí presentado trata de exponer con rigor científico los pros y contras de la técnica, con objeto de estudiar la procedencia de su progresiva implantación en la gestión hídrica y en los esquemas de utilización conjunta. Así mismo pretende presentar el proyecto de investigación **DINA-MAR**, que además de estudiar las zonas proclives para aplicar esta técnica con posibilidades de éxito hidrogeológico, económico y medioambiental, lleva aparejada una importante componente de educación ambiental con objeto de dar cabida a técnicas alternativas e infrautilizadas de administración hidráulica.

¹ AR: Artificial Recharge y MAR (Managed Aquifer Recharge) son los acrónimo más empleado en foros internacionales de recarga artificial y técnicas integradas en este epígrafe y en Internet.”. Su utilización tiene quórum en la comunidad científica internacional de habla sajona y está fuertemente extendida en los restantes idiomas. Se ha encontrado en tantas citas y documentación que, finalmente, se ha adoptado este término con el objetivo de homogeneizar.

2 OBJETIVOS

La mayor parte de los objetivos y pretensiones del artículo son consonantes con los del programa de investigación presentado, si bien cabe añadir la pretensión de exponer el estado del arte de la técnica AR, que permita su conocimiento tanto al técnico especializado como al lector sin formación relacionada con el tema.

Los objetivos del proyecto pueden ser agrupados en cuatro categorías: técnicos, medioambientales, estratégicos y comerciales. Dado el carácter de este artículo, se mencionan exclusivamente los más directos:

- Conocimiento de las zonas susceptibles de ser recargadas mediante esta técnica en el territorio nacional en base a criterios técnicos, económicos y medioambientales.
- Desarrollo de nuevos dispositivos de recarga artificial de acuíferos, o adaptación de los ya existentes en otros lugares del mundo, que consigan alta efectividad en cuanto a tasas de infiltración de agua en el acuífero se refiere; escasa entrada de aire en disolución al sistema; intervención en el ambiente hidroquímico adecuado para evitar la formación de precipitados tipo costras calcáreas, etc. que dificulten el paso del agua de recarga a través de cada acuífero. Además:
- Establecimiento de zonas piloto e instrumentación en distintas litologías.
- Adopción de indicadores medioambientales que reflejen los aspectos socio-económicos.
- Elaboración de una metodología para la asignación de caudales ecológicos.
- Posibilidad de regeneración hídrica de elementos clave, tales como humedales, etc.
- Iniciar estrategias de investigación para emplear esta técnica para paliar la desertización y estudiar su vinculación con el cambio climático global.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales previstos son en principio herramientas de hidrogeología clásica portátiles (sondas, tomamuestras, barrenas, etc.), si bien esta previsto instrumentar las zonas piloto con lisímetros, caudalímetros y registradores en continuo.

La determinación de zonas susceptibles se ha realizado mediante operaciones de álgebra de mapas con coberturas temáticas mediante una aplicación GIS suficientemente robusta para tratar una gran cantidad de capas en la extensión de España. Como materiales, cabe destacar el empleo de hasta 30 coberturas geográficas, tales como afloramientos permeables, Uds. Hidrogeológicas, regadíos con aguas subterráneas, cauces fluviales, litología, Espacios Naturales Protegidos, etc.

4 ESTADO DE LA CUESTIÓN

Existen numerosas definiciones de recarga artificial de acuíferos, por lo que nos centraremos en exponer la idea. Se trata de un método de gestión hídrica que permite introducir agua en acuíferos subterráneos.

El origen del agua destinada a este fin puede ser muy diverso. En general procede de ríos, si bien puede ser originaria de depuradoras, desaladoras, humedales, escorrentía en zonas urbanas, etc. Una vez almacenada en los acuíferos, puede ser extraída para distintos usos (abastecimiento, riego, etc.), servir de barrera contra la intrusión marina y contaminación, etc.

Los sistemas utilizados para la recarga artificial pueden ser de diversos tipos: pozos de infiltración, balsas, canales, zanjas, diques, sondeos de inyección, etc.

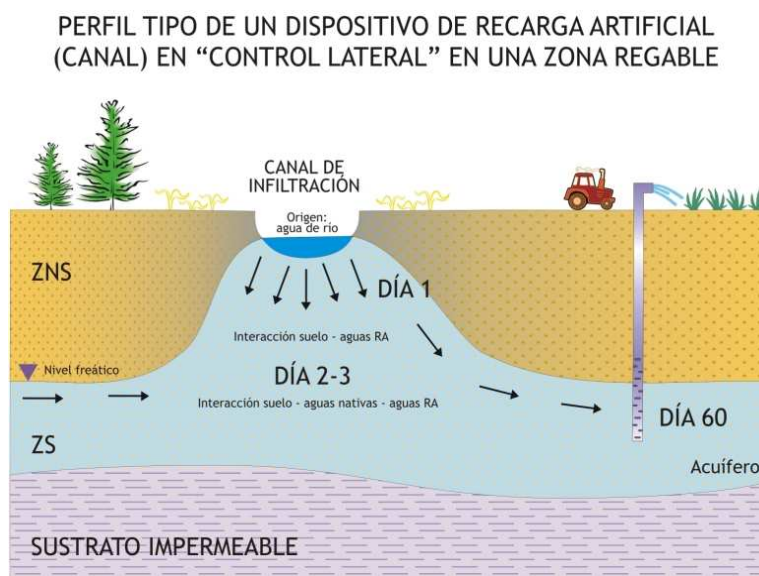


Figura 1. Esquema operativo de un dispositivo de recarga artificial de acuíferos (canal) en una zona regable.

Esta técnica es considerada una “*Driving Force*” (Armenter, 2006), es decir, una actividad capacitada para provocar un impacto (positivo o negativo) sobre la cantidad y la calidad de las masas de agua.

Con objeto de abordar el estado de la cuestión, se ha actualizado con la mayor exhaustividad posible el inventario de dispositivos y experiencias de recarga artificial de acuíferos en España, con menciones al inventario de Europa (Fdez. Escalante, 2005), al considerarse que un inventario de este tipo es un buen indicador del grado de implantación de esta tecnología.

4.1 - Grado de implantación de la tecnología a nivel europeo y nacional

El grado de implantación de estas experiencias en otros países avala la fiabilidad de esta técnica. A este respecto cabe destacar que hay varios países industrializados con fuertes inversiones en dispositivos de AR, tales como Australia, Holanda, USA, Reino

Unido, Canadá, Alemania, República Surafricana, etc. Existen además varios programas en desarrollo en países menos industrializados, tales como Nueva Zelanda, Tailandia, Taiwán, Kuwait, Unión India, etc.

Experiencia en Europa

Las experiencias europeas más relevantes sobrepasan la cifra de 70 en 18 países. Cabe destacar que algunas ciudades, como Dusseldorf y Budapest dependen en un 100% de las aguas de AR, Berlín en un 75%, etc.

Las aguas de recarga derivadas de algún río representan un 45% del abastecimiento en Hungría, un 16% en Alemania, un 5% en Holanda, un 50% en Eslovenia, etc.

En Europa se han ensayado distintos esquemas de recarga artificial desde 1870 en Dusseldorf (Alemania) y desde 1879 en Nijmegen (Holanda) (Grisek et al, 2002b). Desde entonces se han practicado diferentes alternativas, caracterizadas por la carencia de un protocolo común europeo, carencia que persiste en la actualidad.

Experiencia en España

En España hay más de 25 dispositivos (Fdez. Escalante, 2004 y 2005), si bien en general son experimentales o de escasa magnitud (el volumen anual medio de recursos hídricos resultantes de operaciones de AR en España oscila entre 50 y el intervalo de 300 a 350 hm³) (LBAS, 1994; LBAE, 2000).

Además de actuaciones puntuales de escasa envergadura, en general en zonas forestales, El MAPA y el MIMAM, a través del Grupo Tragsa, iniciaron nuevas experiencias en AR en 1996 en la cuenca alta del Guadiana en colaboración con la CHG; (sondeos experimentales en las inmediaciones de Alcázar de San Juan); en torno al año 2000 fue completado el inventario de acequias de careo en el Parque Nacional de Sierra Nevada (Granada y Almería), georreferenciando 23 acequias y llevando a cabo 36 intervenciones en varios tramos de acequias, al menos siete de careo, incrementando su efectividad sin perder su originalidad (Cano-Manuel y González, 2000 y Fdez. Escalante et al, 2006).

Hasta la fecha ha llevado a cabo el proyecto y construcción de nuevos dispositivos de MAR, en unos casos pozos y sondeos, y otros de gran envergadura destinados al regadío, destacando los dos localizados en la Cubeta de Santiuste y Carracillo (Segovia), promovidos y financiados por la Dirección General de Desarrollo Rural (MAPA) y la Junta de Castilla y León. Se trata de dispositivos que toman agua del río Eresma y Cega y Pirón, respectivamente, y a través de una tubería hacen llegar el caudal derivado a un dispositivo superficial tipo canal, con hasta 12 km de longitud, con balsas intercaladas, que permite la infiltración de aguas en el acuífero en invierno y el riego con las mismas en verano.

Otras instituciones han realizado estudios y obras sobre el tema. A este respecto cabe destacar el Instituto Geológico y Minero de España, en colaboración con otros organismos, como el IRYDA, Gobierno Autónomo de la Rioja, Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), Diputación de Alicante, etc., quienes han efectuado, desde 1984, varias experiencias piloto, con una

abundante bibliografía asociada (citada a continuación). En Cataluña se ha aplicado la técnica desde 1969 a cargo de AGBAR, la Agencia Catalana del Agua, etc. (Pérez-Paricio et al, 2001).

El inventario de actividades llevadas a cabo hasta la fecha queda así:

1. Sistemas ASR en Cornellá (AGBAR), pozos y sondeos de infiltración y escarificación/AR del lecho de los ríos Besós y Llobregat por la SGAB-ACA (Parejá, Barcelona) y el Papiol (Baix Llobregat) (Pérez-Paricio, 1999; Armenter, 2006; Barbieri, 2006).
2. Dispositivos recarga artificial superficial del MAPA (canales y balsas) en las comarcas de Santiuste y Carracillo (Segovia), consiguiendo volúmenes de infiltración superiores a 10 hm³/año en el ciclo 2005/06 (Galán et al, 2001; Fdez. Escalante & López, 2002; Fdez. Escalante, 2005).
3. Un sondeo profundo en el valle del Esgueva (Valladolid), (Murillo et al, 2001 y 2002; Murillo, 2002; De la Orden et al, 2003).
4. Tres balsas de infiltración en el aluvial del Río Oja (La Rioja), (Murillo et al, 2001 y 2002; Murillo, 2002; De la Orden et al, 2003).
5. Experiencias Canal de Isabel II. Un sondeo profundo en Madrid ensayado en 2001 (Casilla de Valverde, con el que se recargaron 450.000 m³ de agua pretratada, originando importantes problemas de colmatación en los filtros y entrada de aire al sistema, reduciendo la tasa de infiltración). Actualmente hay tres nuevos sondeos operativos (Casilla de Valverde II, La Cabaña y Fuencarral), diseñados de forma que se minimice el impacto aprendido en la experiencia previa, en espera de concesión de caudal por parte de la Confederación Hidrográfica del Tajo (información verbal técnicos CYII, 2006; resolución de 7 de marzo de 2005, BOE 91/2005 de 16 de abril de 2005).
6. Pozos infiltración en la Plana de Castellón y Vall Dúxo (Castellón), (Plan Hidrológico de la Cuenca del Júcar 1997).
7. Un sondeo profundo y represas en Jijona (Alicante) (Murillo et al, 1999).
8. Diques en el acuífero de Orba, en el aluvial del río Girona (Alicante). Los volúmenes totales de agua infiltrada para toda la serie estudiada son de 0,22 hm³. (Murillo et al, 1999).
9. 49 diques de retención cuenca media y alta del río Girona, entre presa de Isbert y azud de la Comunidad de Regantes de Vergel-Setla (Alicante) con un volumen medio anual infiltrado de 2,27 hm³. 10 pozos con galerías en profundidad entre el azud y la desembocadura del río Girona, con un volumen medio anual de 4,81 hm³ (ambos para el periodo 1974-85), (Murillo et al, 1999).
10. Dos bombas en el Manantial de Murla para recarga artificial del acuífero de Olivereta (Alicante). En una situación ideal, el volumen anual recargado sería de 0,25 hm³, (Murillo et al, 1999).

11. Balsas de infiltración en el acuífero de Masets-Alcoyes, Torremanzanas (Alicante). (Murillo et al, 1999).
12. Una galería de drenaje y cuatro pozos de gran diámetro dotados de galerías en la Plana de Gandía-Denia, sector Vergel-Els Poblets (Alicante). En el año hidrológico 1996-97 la recarga artificial del acuífero fue estimada en aproximadamente 1,55 hm³, representando un 14% de incremento sobre el total de los recursos del sistema, (Murillo et al, 1999).
13. Diques en el acuífero de Jávea. Para la simulación realizada en el periodo de 1962 a 1997, en condiciones óptimas de la capacidad de las instalaciones, la infiltración anual media es de 0,48 hm³, la máxima es de 1,04 hm³ y la mínima 0,11 hm³. En el caso de menor capacidad de las instalaciones la infiltración anual media sería de 0,28 hm³, la máxima de 0,60 hm³ y la mínima 0,08 hm³ (Armador et al, 2001).
14. Conducción y ocho pozos de inyección por bombeo en S'Estremera (Mallorca) (Resolución de 28 de enero de 2003, de la Secretaría General de Medio Ambiente, BOE 45/2003 de 21 de febrero de 2003).
15. Un sondeo profundo en Mancha Real (Jaén), (Rubio et al, 2002).
16. Dos zanjas de infiltración de pequeño tamaño y dos sondeos. Acuífero de Alcalá la Real (Jaén), (López-Geta y Murillo, 1995).
17. Un sondeo profundo en el acuífero de Gracia-Morenita, Valdepeñas de Jaén. Para el ensayo de 43 días se "inyectó" un volumen de 70.642 m³ (Rubio et al, 1995).
18. Cinco balsas de infiltración en la vega de Guadix (Granada), (Murillo et al, 2001 y 2002; De la Orden et al, 2003). Actualmente no operativos.
19. Dos balsas de infiltración en las Dehesas de Guadix (Granada). En el año 1999 se vertió un caudal total de 13.138 m³ de aguas residuales (Murillo et al, 2001 y 2002; De la Orden et al, 2003). Actualmente no operativos.
20. Infiltración del agua de drenaje de la mina de Alquife (Granada), inoperativo desde 1995.
21. Al menos 23 acequias de careo de origen árabe (siglos XIII a XV) operativas en la actualidad en la falda de Sierra Nevada (Granada y Almería), aprovechando aguas del deshielo para la recarga artificial de acuíferos (Cano-Manuel y González, 2000; Fdez. Escalante et al, 2006).
22. Una fosa de infiltración en Carmona (Sevilla), (Silgado et al, 2002).
23. Pozos y zanjas de infiltración en el Aluvial del bajo Guadalquivir (Sevilla). (García-Hernán, 1997; Armador et al, 2001b).
24. Un sondeo profundo en Marbella (Málaga), (comunicación verbal de Aquagest).

25. Dos pozos rellenos de grava en el aluvial del Guadalete (Cádiz). En la experiencia de duración 52 horas entre los días 17 al 19 de abril de 2001 se infiltraron 1500 m³, (Pachón et al, 2001).
26. Seis balsas de infiltración en Mazagón (Huelva). (Murillo et al, 2001).
27. Dos sondeos experimentales junto al canal del Guadiana en Alcázar de San Juan, Ciudad Real.

El caudal total infiltrado en las experiencias con mención de resultados (diez de las 26, sobrepasa un volumen de 36.593 hm³/año (excluidos la mayor parte de los dispositivos de Cataluña, que son que infiltran un caudal mayor). Esta cifra que cuestiona los datos oficiales sobre el volumen de agua recargada de forma artificial en 1994 (50 hm³), pareciendo más veraz la estimada en el LBAE 2000 (300-350 hm³/año).

Los dispositivos inventariados, con expresión de su tipología, se presentan en la figura 2. En ella se percibe que la mayor parte de las experiencias llevadas a cabo hasta la fecha se basan en dispositivos superficiales, con graves impactos de colmatación y estudios serios para su prevención, cuantificación y corrección.

En los últimos años la tendencia general es la construcción de sondeos profundos, generalmente a cargo de empresas de abastecimiento de agua potable, marcando un cambio en la tendencia habitual más implantada con la práctica, según la cual en España hay gran disponibilidad de agua de origen fluvial para la recarga artificial.

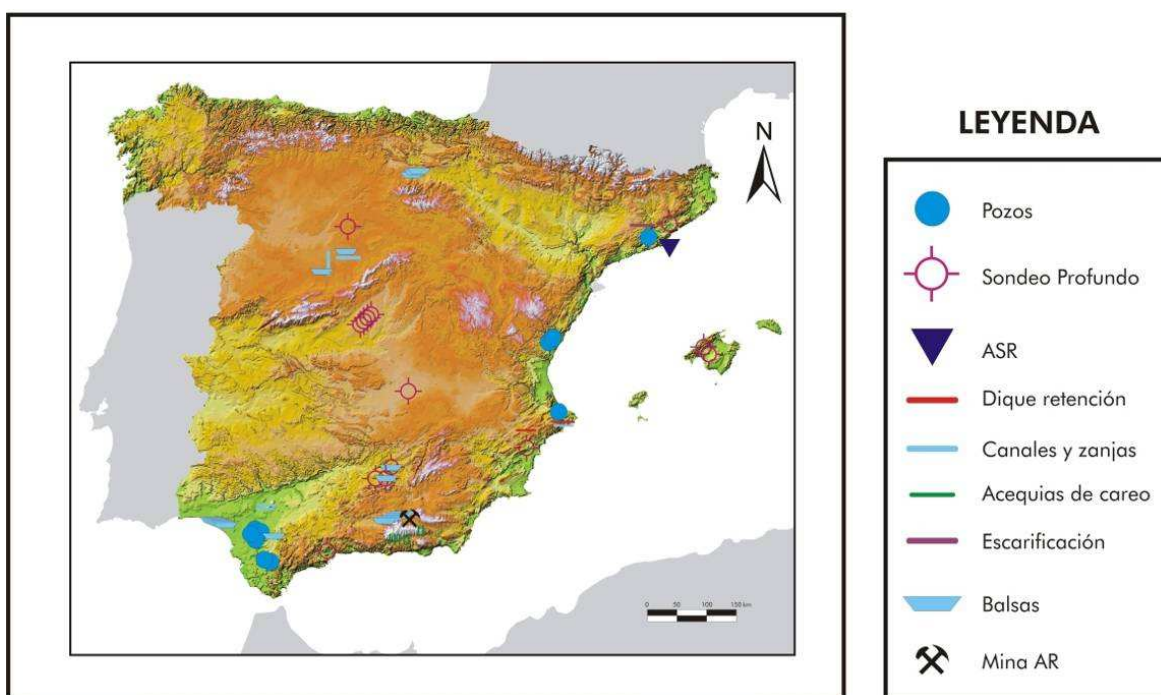


Figura 2. Principales estructuras y dispositivos de MAR operativos en España y tipologías.

5 DISCUSIÓN

En este apartado se indican algunas de las principales utilidades y ventajas de la técnica MAR, opuestas a sus inconvenientes, con objeto de presentar la técnica con el rigor científico necesario.

Entre las **ventajas** cabe destacar:

- **Almacenar agua en los acuíferos**, especialmente en zonas de escasa disponibilidad de terreno en superficie o sin posibilidad de otras formas de embalsamiento. La AR permite el empleo de la superficie para determinados usos, habiendo un embalse en profundidad en general con volúmenes almacenados nada desdeñables. La técnica permite además almacenar agua en zonas de uso forestal en invierno para, contando con la movilidad de las aguas subterráneas, poder aprovechar estos recursos “aguas abajo”, por ejemplo en zonas regables o abastecimientos urbanos, en verano.
- **Eliminación** de patógenos, **sustancias químicas nocivas, etc.** del agua durante el proceso de infiltración a través del suelo y su posterior residencia en el acuífero, reduciendo riesgos medioambientales, incluidos aquellos para la salud. La capacidad de autodepuración del terreno depende de la litología del acuífero, siendo mayor en acuíferos detríticos que cársticos. De este modo, la calidad del agua a introducir se convierte en un proceso complicado y delicado, de modo que la carga contaminante no deberá sobrepasar la capacidad de acogida del medio, su potencial autodepurativo, ni originar problemas importantes de obstrucción o colmatación de los dispositivos de AR, que es el principal impacto que amenaza ya afecta a las instalaciones.
- Utilización del **acuífero** como **embalse regulador**, almacén y red de distribución dentro de un sistema integrado. La recarga del acuífero en cabecera permitirá la extracción aguas abajo en el momento oportuno sin necesidad de invertir en conducciones ni artificios de distribución artificiales.
- **Suavizar fluctuaciones en la demanda** y reducir el descenso del nivel del agua por sobrebombeo. El volumen de agua almacenada puede representar cantidades muy superiores a la disponible en embalses superficiales, que permitirán cubrir picos de demanda. De hecho tradicionalmente el abastecimiento a Madrid se ha llevado a cabo con aguas superficiales, si bien se han construido varias baterías de sondeos para incorporar aguas subterráneas en la red de suministro en periodos de sequía o para cubrir déficits ocasionales permitiendo el mantenimiento de caudales ambientales en los embalses superficiales.
- **Reducir las pérdidas por evaporación** respecto a presas y balsas.
- **Compensación** de la pérdida de **recarga natural** en un acuífero por actividades antrópicas. Las edificaciones y el trazado de amplias superficies de hormigón y de sistemas de canalización disminuyen drásticamente la capacidad de infiltración en las ciudades. Una alternativa importante bien desarrollada en la Unión India es la recarga artificial con las aguas de escorrentía en terrenos improductivos, tejados de edificios, etc.
- **Suavizar diferencias cualitativas**, evitando que las aguas de inferior calidad del acuífero se desplacen hacia captaciones de buena calidad. La introducción de una pluma

de aguas limpias en el subsuelo, aunque cuente con la catalogación de vertido si las aguas de recarga artificial difieren cualitativamente de las aguas indígenas, representa un impacto positivo, al inducirse una barrera hidráulica que impide la movilidad de las aguas subterráneas de peor calidad y su expansión en el acuífero.

- **Regeneración hídrica** de elementos clave (**humedales**, etc.). Esta técnica aunque se lleva aplicando indirectamente desde hace décadas (p.e. la regeneración hídrica de las Tablas de Daimiel con aguas procedentes de sondeos) está adquiriendo una importancia creciente al desarrollarse nuevas actividades, abriendo una puerta importante a la dimensión medioambiental que es tratada con mayor detalle

- **Barrera para la intrusión marina**. En España hay algunos ejemplos bien desarrollados de AR para esta finalidad en el arco mediterráneo, p.e. en Barcelona y Alicante

- **Prevenir problemas geotécnicos**. El descenso de niveles freáticos ocasionalmente ha generado problemas de geotécnicos de diverso tipo, como por ejemplo asentamientos del terreno al ver modificada su capacidad portante, o cimentaciones mal diseñadas al haber sido calculadas con una presión intersticial superior a la que hay tras un descenso acusado del nivel del agua. Este hecho se traduce en grietas en los edificios, asentamientos diferenciales, etc. Algunos buenos ejemplos ya son clásicos en ciudades como Murcia.

- **Evacuación y depuración de aguas residuales urbanas** (reutilización). Las aguas residuales pueden ser una fuente de agua idónea para la AR, si bien, la concentración de contaminantes debe estar bien controlada. En ocasiones la técnica se emplea más para la depuración de esta agua que para la recarga del acuífero propiamente dicha. En las citas bibliográficas hay menciones acerca de la calidad de las aguas (estándar de calidad) de recarga artificial para que no representen un impacto acusado (EWRI-ASCE, 2001, Fdez. Escalante, 2005).

- **Integración de actividades “lesivas” en el marco del desarrollo sostenible**. Los descensos acusados del volumen almacenado en los acuíferos, sobreexplotación, etc. podrían resultar correctos desde un punto de vista de gestión hídrica si en lugar de aplicar medidas preventivas se aplican correctoras o compensatorias. La técnica AR se perfila como una de las medidas principales para corregir los impactos acumulativos generados en estas circunstancias. Un ejemplo relevante es la disminución del aterramiento de presas y canales (CMR-UICN, 2000).

- **Mejora económica zonas deprimidas**. Algunas comarcas y especialmente ciertas zonas regables requieren extraer recursos hídricos por encima de la tasa de recarga natural para mantener su actividad, como es el caso de las comarcas segovianas de Santiuste y Carracillo. Gracias a los dispositivos de AR su economía no se ve afectada por el acusado descenso de los niveles freáticos registrados durante los últimos 30 años, permitiendo incluso la implantación de nuevos regadíos en terrenos tradicionalmente en secano.

Por último, la técnica se perfila adecuada en determinados aspectos del combate a la desertización y cambio climático, acarcavamiento, erosión de suelos, generación de energía a pequeña escala para el mantenimiento de los dispositivos de vigilancia y control, etc. Algunas de las medidas más factibles son el mantenimiento de masas forestales, sistemas dunares, humedales y elementos clave, etc. Todos estos aspectos

se encuentran en los objetivos del proyecto DINA-MAR en su fase de desarrollo tecnológico.

Entre los **inconvenientes** “genéricos” de esta técnica, cabe mencionar:

- Grado de **conocimiento incipiente de su potencial y posibilidades**. Hasta la fecha las publicaciones en español son escasas, no ha habido una integración en ningún programa de educación ambiental que se conozca y la mayoría de la población ignora su capacidad y posibilidades.

- **Visión principalmente hidráulica** de la política española de **gestión hídrica**. Tradicionalmente se ha recurrido al embalsamiento superficial como técnica de gestión más vanguardista, que ha llegado a integrarse en la conciencia colectiva del español, quedando las restantes opciones relegadas a un segundo plano.

La importancia de los embalses a nivel mundial es patente, quedando España ubicada en una posición 6ª en el ranking de agua superficial embalsada en represas (CMR-UICN, 2000) (figura 3).

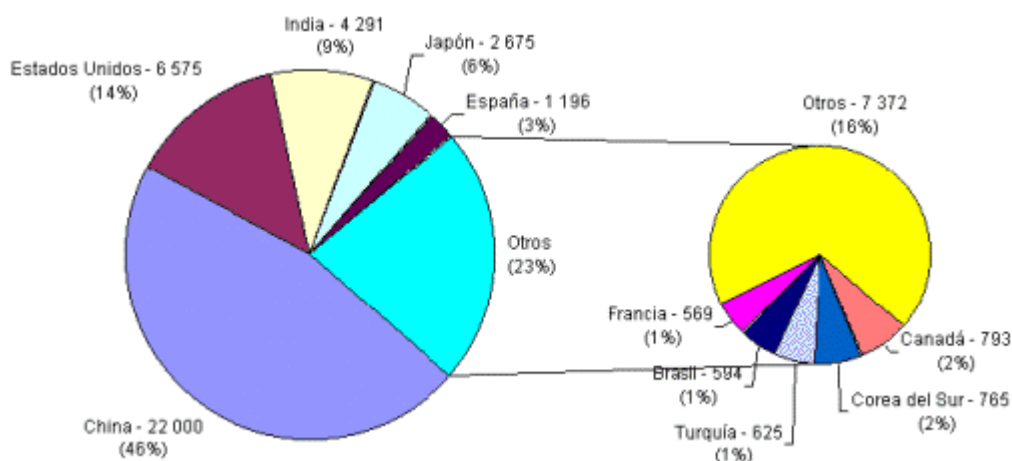


Figura 3. Cálculo aproximado de la CMR. Fuente: CMR-UICN, 2000.

- **Escasez y falta de continuidad en las experiencias**. Gran parte de las experiencias han contado con escasa difusión de resultados e incluso continuidad en el tiempo, en general por problemas de colmatación, si bien, las operaciones van cobrando una importancia creciente. Cabe destacar los dispositivos construidos por el MAPA en Segovia, de gran envergadura (superficie de infiltración superior a 50.000 m²) cuyos costes aproximados se han elevado, aproximadamente, a 3,95 millones de euros en el caso de la cubeta de Santiuste (MAPA 2005a) y unos 13,9 millones de euros en la comarca del Carracillo (previsiones del Consejo de Ministros del 28 de agosto de 1998; MAPA, 2005b).

- **Escasa dedicación en las publicaciones de gestión hídrica del país hasta la fecha**, como son los textos del Libro Blanco de las Aguas Subterráneas, LBAS, (MOPTMA-MINER, 1994), el Libro Blanco del Aguas en España, LBAE, (MIMAM, 2000b), etc. En los últimos años ha habido un esfuerzo importante por difundir las experiencias. A este respecto cabe destacar la labor del personal del IGME desde 1999 y la defensa de, al

menos, siete tesis doctorales relacionadas con la temática en las distintas universidades españolas hasta la fecha.

- Es preciso un **control durante el diseño y construcción**, así como realizar distintos proyectos para minimizar los riesgos e impactos ambientales. Un tema de especial relevancia es el estudio de los caudales ambientales o ecológicos en los cauces de toma, para aquellas experiencias en las que el agua procede de cauces fluviales, que son la gran mayoría, abriendo una importante línea de debate cuya solución debe pasar por el estudio detallado y pormenorizado de cada caso específico.

- **Incipiente grado de conocimiento de las limitaciones** de la técnica AR. En ocasiones y tras varios años de experiencia en un dispositivo determinado, pueden concurrir determinados problemas no previstos que malogren los dispositivos (colmatación, inundaciones, etc.), o incluso descensos en el caudal de las fuentes de toma, en general propiciados por sequías, que marcan nuevas limitaciones en el empleo de la técnica, de ahí la importancia de realizar estudios y proyectos correctos, no solo de impacto ambiental sino también análisis de riesgos antes de emprender una actuación.

Un método efectivo para combatir los obstáculos mencionados consiste en la difusión de experiencias e investigaciones de programas multidisciplinarios de carácter científico-técnico de manera planificada y rigurosa (Pérez Paricio et al, 2000b).

Volviendo al grado de implantación de la técnica en España, el Plan hidrológico Nacional de julio de 2001 (Ley 10/2001, de 5 de julio, BOE, nº 161), contempla la ejecución de 889 acciones en todo el territorio español, con un coste aproximado de 25.000 millones de euros. Este listado corresponde a nuevas presas y embalses (117 en total), canalizaciones y regulaciones del cauce de los ríos, proyectos que aumenten la capacidad de embalses actuales y actuaciones de menor envergadura, tales como la mejora de carreteras, aumento de la eficiencia en el riego y reparación de embalses, presas y canales ya existentes. De este presupuesto, aproximadamente un 23 % estaba destinado a técnicas alternativas o especiales (desalación, tratamiento u abastecimiento de agua), incluyendo en este epígrafe los dispositivos de recarga artificial de acuíferos, estando prevista la construcción de 33 nuevos dispositivos (MIMAM - MCYT, 2000), cifra sobrepasada en los planes hidrológicos de cuenca; si bien apenas se han construido 10 desde entonces a la actualidad según la información analizada que se menciona en la bibliografía. Como ejemplo adicional, el PAIH del MIMAM alude a la AR en la cuenca del Duero como “técnicas especiales”.

Las actuaciones previstas distribuidas por cuencas hidrográficas son:

CUENCA HIDROGRÁFICA	ACTUACIONES AR PREVISTAS
Duero.	4
Guadiana.	2
Tajo.	1
Guadalquivir.	9
Sur	7
Júcar	8
Ebro	2

Tabla 1. Nuevas actuaciones de AR previstas en las cuencas españolas (MIMAM - MCYT, 2000).

La Ley 11/2005, de 22 de junio, por la que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional, en su exposición de motivos, menciona la inviabilidad económica del trasvase previsto en el PHN de 2001, y menciona la existencia de “alternativas técnicamente más recomendables, ligadas a la gestión de la demanda, a la utilización de desaladoras y a la reutilización de recursos, que pueden atender una demanda justificada y legítima, paliar la sobreexplotación y contaminación de acuíferos, y asegurar el mantenimiento de los ecosistemas de interés natural, garantizando un uso más racional y sostenible de los recursos hidráulicos”.

Esta misma ley, en su anexo 4, 2.3.f., menciona la intención de llevar a cabo una única actividad “f) Regulación para recarga de los excedentes invernales del río Belcaire”, lo que reviste la idea de que la recarga artificial de acuíferos sigue estando escasamente considerada por los gestores hídricos del país en la actualidad.

Comparando la técnica AR con otras alternativas de gestión hídrica, en especial la desalación, cabe destacar que aunque el agua recuperada tras la recarga artificial puede necesitar ser tratada, su salinidad siempre será inferior a la del agua del mar, por tanto, la energía requerida en el proceso y sus costes son menores a los de la desalinización, además de ser una técnica más limpia en cuanto a la generación de residuos se refiere.

Algunos análisis económicos realizados indican que el agua procedente de la gestión de la recarga de acuíferos (MAR) tiene unos costes ligeramente inferiores al coste medio del agua desalada, aspecto que es contemplado en el apartado siguiente del artículo.

5.1 Análisis económico de la recarga artificial de acuíferos (AR o MAR)

En este apartado se ha llevado a cabo un análisis preliminar del coste económico de esta tecnología frente a otros sistemas de gestión hídrica convencionales.

Para ello se ha recopilado información relativa al coste de construcción de varias presas, balsas, dispositivos de recarga artificial de acuíferos (AR) y costes del agua desalada.

Se trata de un análisis preliminar, al haber un volumen de información bastante escaso. El indicador adoptado ha sido el ratio entre el coste de construcción y el volumen de agua almacenada, también y suministrada cuando se ha conseguido esta información.

No se ha entrado en consideraciones relativas a costes de amortización, vida media de las estructuras y otros cálculos a largo plazo, al no haber información suficiente ante la juventud de la mayor parte de las experiencias de AR en el estado español. Se ha conseguido información relativa a 16 balsas edificadas recientemente, cuyo listado se adjunta como tabla 2.

BALSA	SITUACIÓN	VOLUMEN (m3)	TIPOLOGÍA	PRESUPUESTO (€)	RATIO (€/m3)
Montesusín 1 (Flumen)	Huesca	300.000	Semiexcavada	930.000	3.10
Montesusín 2 (Flumen)	Huesca	165.000	Excavada	880.000	5.33
Huerto	Huesca	89.000	Semiexcavada	1.150.000	12.92
Huerto elevada	Huesca	27.000	Semiexcavada	495.000	18.33
Salillas	Huesca	21.000	Semiexcavada	275.800	13.13
Fuentes de Ebro	Zaragoza	213.000	Semiexcavada	2.100.000	4.49
Najerilla MD	La Rioja	65.000	Excavada	300.000	4.01
La Zaballa (Najerilla MI)	La Rioja	195.000	Excavada	875.000	5.15
La Cantera (Najerilla MI)	La Rioja	150.000	Semiexcavada	602.000	13.25
La Mesa (Najerilla MI)	La Rioja	227.000	Semiexcavada	1.170.000	6.61
Payuelos A0	León	55.000	Semiexcavada	729.000	10.63
Olmiños	Soria	115.000	Semiexcavada	760.000	9.50
Xinzo 1	Orense	40.000	Semiexcavada	425.000	19.00
Xinzo 2	Orense	20.000	Semiexcavada	190.000	22.50
Adra	Almería	40.000	Semiexcavada	760.000	10.24
Algarrobo	Málaga	20.000	Semiexcavada	450.000	9.77

Tabla 2. Relación de balsas de reciente construcción, tipología y datos relativos a su coste y volumen de almacenamiento, así como ratio coste/agua almacenada (€/m3).

El ratio medio de todas ellas asciende a **10,50 €/m3**.

El mismo cálculo se ha llevado a cabo con ocho presas, listadas en la tabla 3. El ratio resultante medio es de 1,25 €/m3.

PRESA	SITUACIÓN	ALTURA (m)	VOLUMEN (hm3)	TIPOLOGÍA	PRES. EJEC. MATERIAL (€)	RATIO (€/m3)
Arauzo de Salce	Burgos	28.00	4.80	Homogenea	4.476.366.20	0.93
Las Cuevas	Palencia	45.50	10.90	Espaldones escollera	5.227.789.64	0.48
Villafria	Palencia	46.50	12.01	Espaldones escollera	5.446.875.05	0.45
Valderas	León	19.50	8.28	Espaldón todo-uno con núcleo	3.525.712.13	0.43
Espeja	Soria	21.00	9.54	Espaldón todo-uno con núcleo	3.136.119.05	0.33
Peñafiel	Valladolid	33.00	4.66	Núcleo inclinado	4.800.000.00	1.03
Sonsierra Riojana	Rioja	37.00	2.99	Espaldones grava	14.442.249.93	4.83
Lastanosa	Huesca	41.00	9.85	Espaldones de grava	14.696.813.95	1.49

Tabla 3. Relación de presas de reciente construcción, tipología y datos relativos a su ejecución material y volumen de almacenamiento, así como ratio coste/agua almacenada (€/m3).

El coste del agua en los dispositivos de AR varía entre límites más anchos, dependiendo de la naturaleza del dispositivo, edad, años en funcionamiento, etc. Se han analizado los siguientes ejemplos, que corresponden a todos a los que se ha podido acceder a la información, sin excluir ninguno.

- Dispositivo superficial Cubeta de Santiuste (Segovia). Los costes de la obra ascienden a 3.341.212 € para la construcción del primer caz (obra de toma, construcción de trasvase y arroyo de recarga 1). La construcción del segundo canal de recarga artificial, tras adquirir una experiencia suficiente sobre el comportamiento del acuífero, tuvo un coste de 606.867 €, si bien el volumen de agua infiltrado fue aproximadamente el doble en el último ciclo (1 de noviembre de 2005 al 1 de mayo de 2006) que en los tres previos. El ratio medio en sus cuatro años de funcionamiento: coste obra /agua infiltrada desde el dispositivo al acuífero asciende a 0,39 €/m³. En los dos primeros ciclos de menor efectividad y circunstancias climáticas adversas, el coste fue de 1,20 €/m³, mientras que en el último ciclo, con un nuevo canal con una tasa de infiltración alta, un buen conocimiento del sistema y un año de sequía, los costes se redujeron a 0,10 €/m³.
- El dispositivo superficial (canales) del Carracillo (Segovia), para el primer ciclo de operatividad completa (2003/04) tuvo un coste económico de 0,15 €/m³, de acuerdo con los datos del MAPA, 2005).
- El caudal inyectado a través del dispositivo experimental (sondeo de inyección) ensayado en el año 2001 por el Canal de Isabel II (Casilla de Valverde, Madrid), tuvo un coste económico de aproximadamente 169,79 pts o 1,02 €/m³. Para este cálculo se han tenido en cuenta los costes de perforación y equipamiento, costes por bombeo para limpieza del sistema dual (estimados en 1,5 kw/m³), coste de los bombeos para limpieza (aproximadamente el 5 % del volumen recargado), costes por aducción, tratamiento del agua para abastecimiento, proyecto y estudio de impacto ambiental. Se recargó un total de 450.000 m³ de agua pretratada, originando importantes problemas de colmatación, sobre todo por la entrada de aire en el sistema por caída libre a través de la tubería de impulsión, concluyendo en la necesidad de inyectar agua a través de tuberías en carga, con dispositivos de regulación de la velocidad, etc.
- Los costes estimados en los dispositivos de AGBAR en Barcelona (Cornellá) ascienden a 0,08 €/m³, sin tener en cuenta los costes de amortización de las obras (Armenter, 2006).

Analizando los datos, podemos establecer unas primeras aproximaciones a la realidad económica de cada técnica. Aplicando valores medios, los resultados son:

- Ratio balsas: 10,50 €/m³.
- Ratio presas: 1,25 €/m³.
- Ratio dispositivo AR superficiales: 0,21 €/m³.
- Ratio dispositivo AR profundos: 1,02 €/m³ (abastecimiento urbano).
- Desaladoras: 0,45 a 0,90 €/m³ (en periodo de amortización).

Estos datos, aunque carezcan del rigor de un análisis económico completo, permiten afirmar que los costes del agua procedente de operaciones de gestión de la recarga de acuíferos (MAR), considerando valores medios de dispositivos superficiales (más baratos) y profundos, son algo inferiores al coste medio del agua desalada. El precio por metro cúbico es inferior a la mitad del embalsado en presas y balsas.

A tenor de estos resultados se desprende que los costes del agua son asumibles y descendentes a medida que se avanza en el grado de conocimiento de la técnica MAR,

especialmente desde que se ha mejorado el diseño de los dispositivos de recarga profunda, que adolecían hasta la fecha de falta de experiencia.

A la ventaja económica cabe añadir que la ocupación del terreno es mínima frente a la superficie ocupada por embalses tradicionales, que la técnica se perfila como una alternativa de peso en terrenos de difícil ocupación superficial, y que el valor paisajístico o contingente es incomparable en la mayoría de las ocasiones con las grandes obras hidráulicas.

5.2 Dimensión Medioambiental de la técnica MAR

Toda actuación de recarga artificial de acuíferos debe llevar su correspondiente Estudio de Impacto ambiental (EslA), en la que se especifican con todo detalle los impactos en las distintas fases de actuación (inundación de terrenos de labor y profundidades de alerta, impactos sobre la calidad de las aguas subterráneas, introducción de elementos extraños en el medio, etc.). Para ello hay incluso listados de chequeo específicos [Fdez. Escalante et al, 2006 (en prensa)] y una amplia bibliografía sobre el tema.

En este apartado se pretende presentar las principales líneas de acción previstas en materia de medio ambiente dentro del programa DINA-MAR, que son las relativas a la salvaguarda de los caudales ecológicos en los cauces de toma; las acciones en materia de regeneración hídrica de humedales y otros elementos clave, tales como manantiales desecados, etc. mediante operaciones de MAR, y por último, la definición de un sistema de indicadores medioambientales para la evaluación y el seguimiento de las actuaciones, integrados en un sistema de indicadores que funciona a su vez como un indicador de consecución del objetivo.

Por problemas de espacio, en este artículo se presenta solo un ejemplo real del segundo:

REGENERACIÓN HÍDRICA DE HUMEDALES Y OTROS ELEMENTOS CLAVE APLICANDO LA TÉCNICA MAR.

La regeneración hídrica de humedales con aguas de otro origen no es algo nuevo en nuestro país, con sendas experiencias en espacios naturales protegidos, tales como las Tablas de Daimiel, Fuentedepiedra y otros humedales malagueños desde la década de los ochenta. En estos casos se extraen volúmenes de sondeos que son reutilizados para fines medioambientales.

En este caso concreto se analiza la idoneidad de recuperar humedales y otros elementos singulares degradados con aguas procedentes de dispositivos de recarga artificial de acuíferos. Esta metodología es más novedosa y no existen muchas experiencias al respecto en la bibliografía consultada.

En el invierno de 2005 se ha llevado a cabo una actuación consistente en la restauración hídrica de la Laguna de la Iglesia, en Villagonzalo de Coca (Segovia) con aguas procedentes del dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste. Esta actuación, considerada pionera en algunos foros, ha sido debidamente controlada como “experiencia piloto” con objeto de estudiar la idoneidad y viabilidad de estas actuaciones.

La laguna de la Iglesia es principalmente endorreica y de carácter salino, si bien, el regadío de los terrenos adyacentes trajo su desecación. De este modo, en la última treintena, apenas ha habido agua almacenada en su cuenco tres años según las encuestas a la población local.

En 1999 hubo ocasión de medir los parámetros inestables en la laguna, observándose una conductividad cercana a 4.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un pH cercano a 8,0.

Dentro de las promesas electorales de la corporación municipal de Coca en las últimas elecciones estaba la regeneración hídrica de los principales humedales del Complejo de Coca-Olmedo (Rey Benayas, 1991). Esta intención ha sido llevada a cabo en la laguna de la Iglesia, estando prevista su ampliación tras analizar los resultados de la experiencia en la laguna de las Eras, distante cerca de un km de la anterior, aunque a cota superior.

Para ello se ha derivado una tubería de 80 mm desde el dispositivo de recarga artificial hasta la laguna, enterrada por el margen derecho de la carretera que une Coca con Villagonzalo (figura 4).

En la figura 5 se presenta el aspecto del dispositivo de salida del agua. Esta se hace discurrir por el sustrato salino, de modo que su escasa mineralización inicial (inferior a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$) va aumentando por contacto con las sales del suelo, de modo que en un análisis del cuenco de la Laguna realizado en febrero de 2006 se aprecia que la conductividad es ligeramente superior a 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

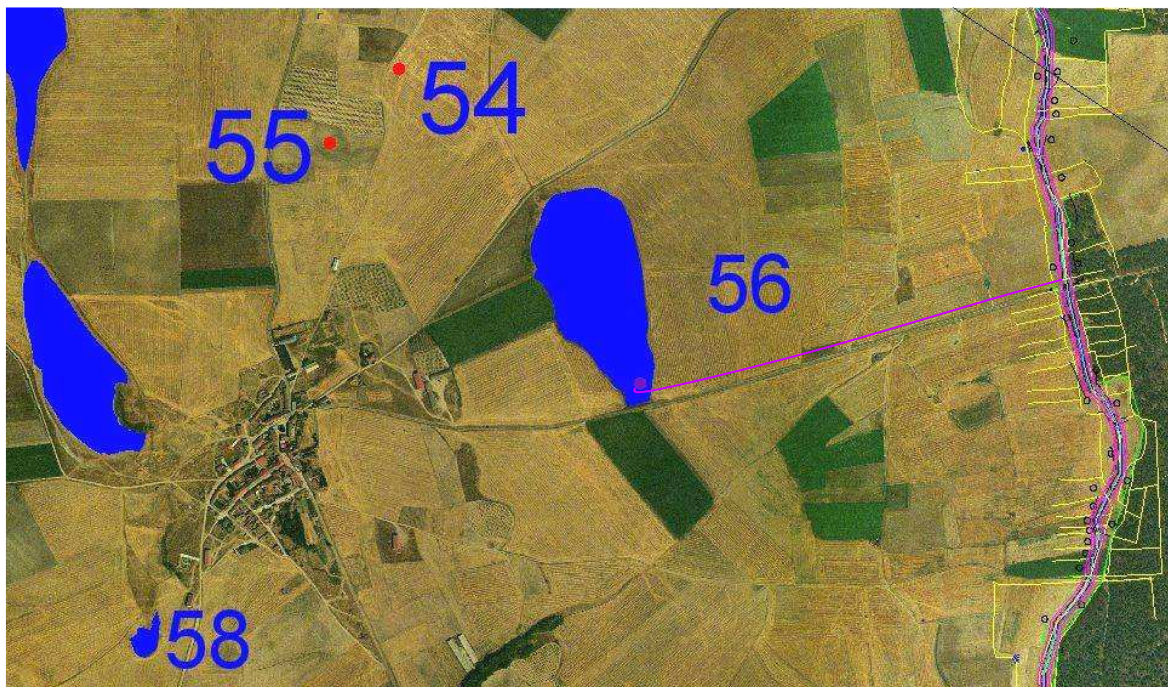


Figura 4. Fotografía aérea de Villagonzalo de Coca (Segovia), remarcando el cuenco de la laguna de la Iglesia (nº 56) y humedales adyacentes inventariados (en Fdez. Escalante, 2005) en un estado de conservación deficiente. En la margen este se ha dibujado sobrepuesto el trazado del dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste. La fotografía aérea es del año 2001.



Figura 5. Regeneración hídrica de la laguna de la Iglesia en mayo de 2005 y detalle del dispositivo de entrada (conocido como “hongo”). Laguna de la Iglesia, Coca (Segovia).

Los caudales derivados no han sido cuantificados, si bien, en un aforo puntual realizado el 12 de febrero de 2006 se calculó una entrada de agua de 0,2 l/s. Si este dato es representativo, el caudal derivado total habría alcanzado la cifra de unos 15.400 m³, cifra insignificante frente a los más de 5 hm³ derivados del río Voltoya al dispositivo de recarga artificial para incrementar el almacenamiento del acuífero. En esta etapa el humedal ha constituido un importante reservorio para la fauna, ante la desecación de la mayoría de los humedales del complejo producida como consecuencia del regadío y del carácter excepcionalmente seco de los años hidrológicos 2004/05 y 2005/06.

Los indicadores medioambientales de respuesta aplicados [Fdez. Escalante, 2006, (en prensa)] revelan que la regeneración hídrica evoluciona en sentido favorable, tanto desde el punto de vista hidrológico como ecológico. Se está generando su orla perimetral entre los cultivos y el cuenco y se percibe una cierta regeneración natural. Los análisis realizados el 12 de febrero de 2006 en el agua de la cabecera del dispositivo y en el cuenco de la laguna se presentan como tabla 4.

Nº	Na	K	Ca	Mg	CL	HCO3	CO3	SO4	NO3	NO2	NH3
Iglesia 06	388.27	16.87	45.31	78.58	460.52	362.40	92.13	318.30	0.00	0.00	0.17
Caz ramal	24.30	2.15	38.55	4.82	34.70	125.73	0.00	16.26	1.50	0.00	<0,04

Nº	B	P	H2SiO3	Fe	Mn	CO2	C	pH	Tª ag	Tª aire
Iglesia 06	0.23	0.26	6.82	0.01	0.00	1.12	2002.00	8.93	22.00	34.00
Caz ramal	0.00	<0,10	5.01	0.06	0.00	1.60	285.00	8.10	18.00	34.00

Tabla 4. Resultados analíticos del agua de la Laguna y del dispositivo de recarga artificial. Fecha de muestreo: 12 de febrero de 2006. Resultados en mg/l.

Estos análisis han sido representados en un hidrograma de Piper-Hill-Langelier y dos hidrogramas de Stiff, con objeto de poder estudiar sus diferencias composicionales de manera mas expresiva y su tendencia evolutiva (figuras 6 y 7).

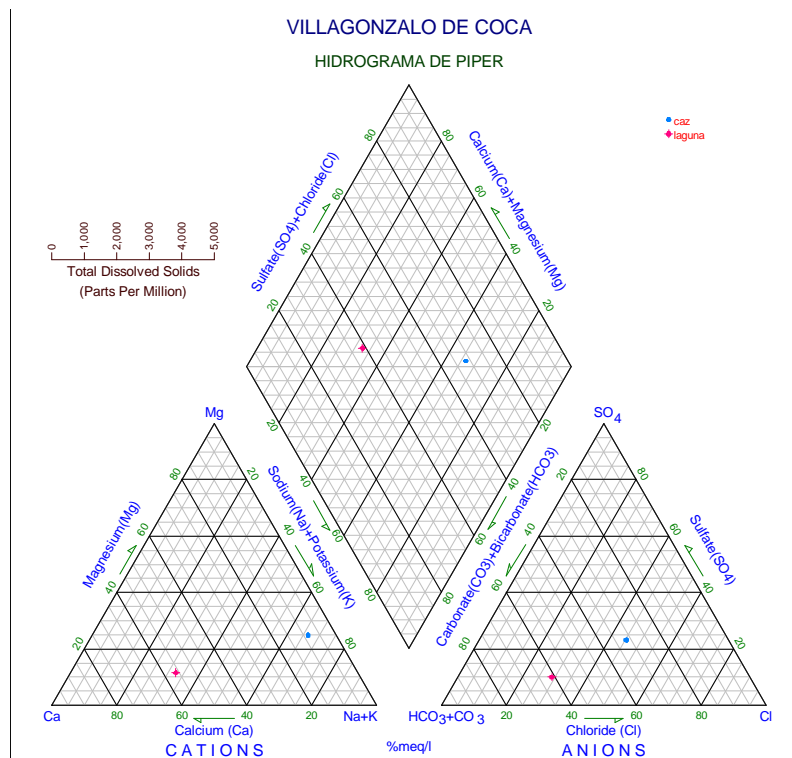


Figura 6. Hidrograma de Piper-Hill-Langelier con representación del agua de recarga artificial y la medida en el cuenco de la laguna de la Iglesia de Villagonzalo de Coca en febrero de 2006.

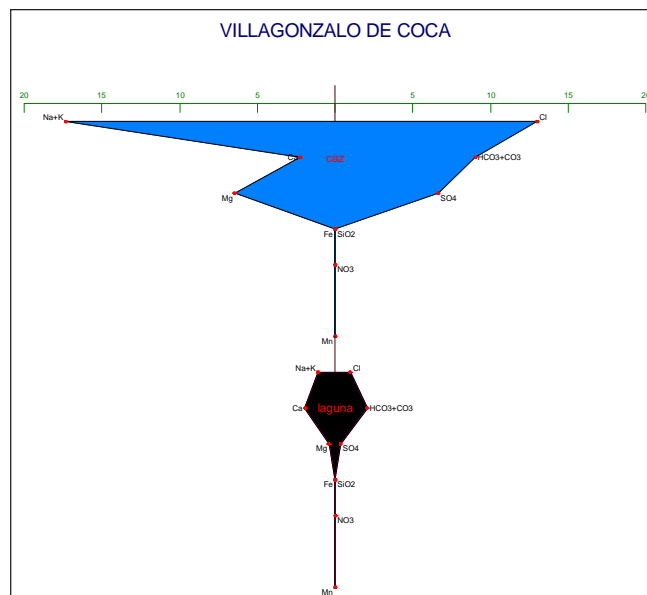


Figura 7. Hidrogramas de Stiff correspondientes al agua de recarga artificial y del cuenco de la laguna de la Iglesia de Villagonzalo de Coca en febrero de 2006.

En general se aprecia un grado de envejecimiento “acelerado” por mineralización (las aguas se disponen en una línea que una los vértices laterales del rombo, mientras que la tendencia normal sería parabólica). Se aprecia un fuerte incremento en cloruros e iones alcalinos, así como de bicarbonatos, sulfatos y magnesio.

El análisis químico de las aguas confirma que se trata de una actuación positiva, aunque fácilmente mejorable, dado que la salinidad alcanzada alcanza apenas la mitad de la medida en 1999 (de acuerdo con las mediciones de conductividad hidráulica). Para ello es necesario incrementar el tiempo de residencia del agua en contacto con el sustrato salino natural, o bien incrementar la superficie de contacto. Con este objetivo hay un dispositivo genérico en la bibliografía de recarga artificial inducida (figura 8), cuya construcción permitiría alcanzar la diana ambiental en cuanto a calidad de las aguas se refiere.

El previsible impacto medioambiental generado cuando las aguas salinas del humedal se infiltraran y mezclaran con las aguas dulces del acuífero es mínimo, dado que el sustrato es de escasa permeabilidad. Además existe una divisoria hidrogeológica (física) que impide el flujo subterráneo en esta dirección, si bien es previsible que este aspecto deba ser considerado en la Evaluación de impacto Ambiental (EIA) de cualquier otra actuación futura. Para ello es preciso contar con un buen conocimiento tridimensional de la geometría del acuífero y de su funcionamiento hidrogeológico.

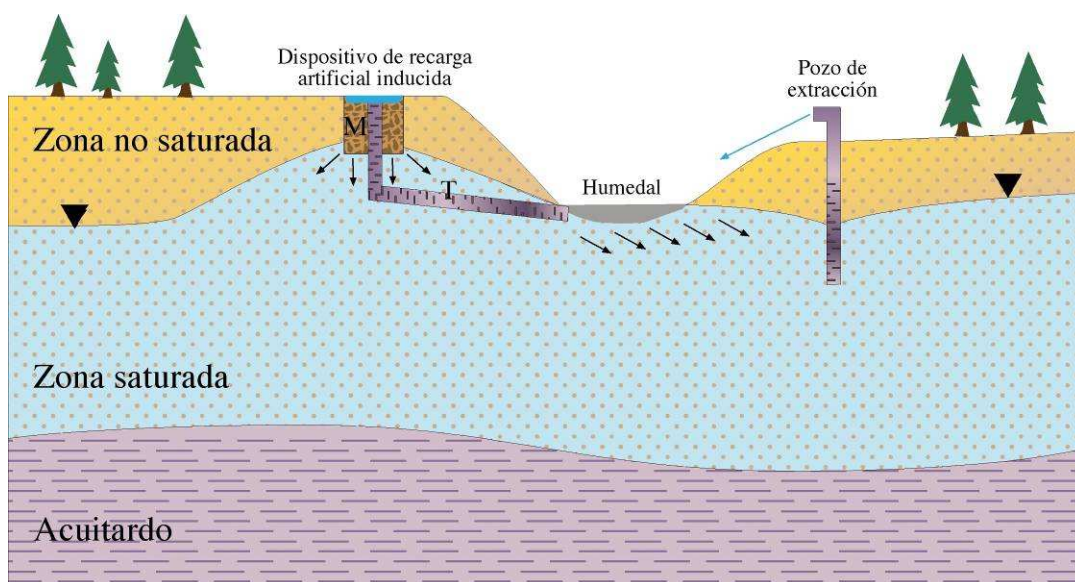


Figura 8. Diseño genérico de un dispositivo de recarga artificial inducida para aumentar la salinidad de las aguas de recarga artificial hasta alcanzar unas características similares a las aguas indígenas regulando la superficie de contacto y el tiempo de interacción con el material salino natural del terreno, precipitado por el ascenso de flujos subterráneos profundos. Fdez. Escalante, 2005.

En cuanto a los aspectos cuantitativos, en la situación hídrica actual se considera posible y procedente “invertir” volúmenes procedentes de ríos para la regeneración de espacios de interés medioambiental, si bien está en tela de juicio si esta actividad podrá mantenerse en el tiempo en caso de mantenerse la sequía actual, agravada por problemas globales tales como la desertización, el cambio climático, etc.

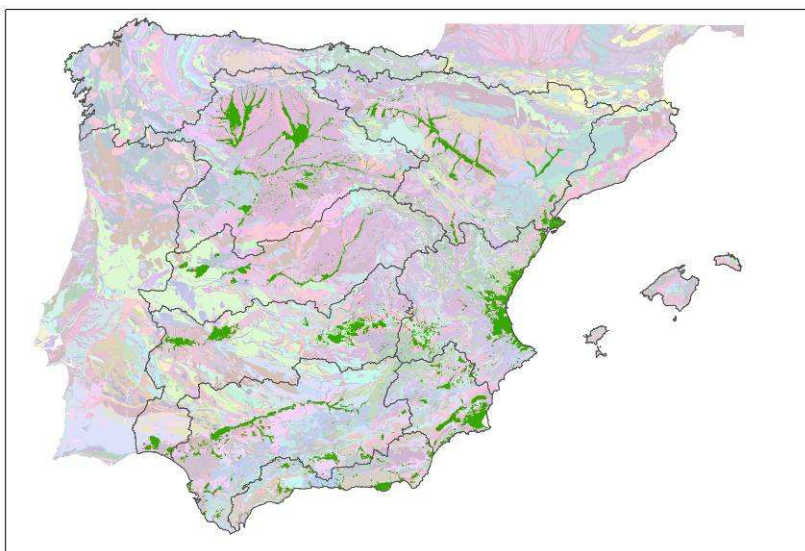
6 RESULTADOS PRELIMINARES

En la actualidad y como objetivo prioritario del proyecto DINA-MAR, se está llevando a cabo el análisis mediante Sistemas de información Geográfica de las coberturas presentadas en el apartado de materiales y métodos, con objeto de determinar zonas susceptibles para la recarga artificial de acuíferos dentro del territorio nacional.

Esta etapa se encuentra en estado de tanteo. Para la consecución de los objetivos se han generado unas primeras coberturas provisionales, resultantes de la intersección de distintas capas temáticas. Las descritas a continuación corresponden a una etapa de tanteo, que permite iniciar el estudio de los primeros resultados, identificar áreas susceptibles y seleccionar zonas piloto para su estudio detallado.

- Cruce de unidades hidrogeológicas con sistemas acuíferos, masas de agua y zonas regadas con aguas subterráneas (cruce 1).
- Cruce de sistemas acuíferos, cauces fluviales de cierta entidad (se han establecido varias categorías de acuerdo con su caudal medio) y su posible zona de influencia (cruce 2).
- Cruce de sistemas acuíferos, usos forestales, zona de influencia en torno a los cauces fluviales (*buffers*) y subcuencas hidrográficas (cruce 3).
- Regadío con aguas subterráneas, sistemas acuíferos y humedales con su zona de influencia (en principio se han considerado *buffers* de 1 km). A este análisis se ha añadido la cobertura con datos relativos a la calidad de las aguas (cruce 4).

Las figuras 9 a) a g), correspondientes al análisis GIS, ilustran el aspecto de los primeros resultados.





Figuras 9 a) a g). Imágenes de los primeros cruces de coberturas temáticas realizados con objeto de determinar las zonas (provisionales) susceptibles de regeneración hídrica en España.

Los resultados de los cruces desprenden listados de polígonos susceptibles para llevar a cabo actuaciones de recarga artificial de acuíferos en ellos. Las superficies calculadas se especifican en la tabla 5.

CRUCE	AREA_CRUCE1	AREA_CRUCE2	AREA_CRUCE3	AREA_CRUCE4
Área (Km ²)	26588	10403	42998	7822

Tabla 5. Resultados preliminares del área susceptible para ser recargada de modo artificial de acuerdo con los distintos cruces de coberturas especificados.

El área total calculada (España peninsular e Islas Baleares) oscila en el intervalo de 27.000 a 43.000 km² en zonas de acuífero en las inmediaciones de cauces fluviales de cierta entidad, en muchos casos con implantación de zonas de regadío con aguas subterráneas.

El área del terreno susceptible de albergar volúmenes adicionales a los aportados por la recarga natural con uso forestal, generalmente ubicado en las cabeceras de cuenca, es ligeramente inferior a 9.000 km².

Los terrenos asociados a cauces fluviales o humedales con la misma particularidad del caso anterior alcanzan los 10.500 km².

La distribución por cuencas hidrográficas quedaría del siguiente modo (tabla 6).

Nº	CUENCA	Cruce 2 (km ²)	%	Cruce 3 (km ²)	%
1	NORTE II	1	0.01	1473	3.48
2	DUERO	2699	25.95	11113	26.23
3	TAJO	973	9.35	5515	13.02
4	GUADIANA I	881	8.47	2972	7.02
4	GUADIANA II	24	0.23	91	0.22
5	GUADALQUIVIR	1406	13.51	3500	8.26
6	SUR	468	4.50	1674	3.95
7	SEGURA	494	4.74	1633	3.85
8	JUCAR	1224	11.77	5884	13.89
9	EBRO	1822	17.51	6599	15.58
10	C.I. DE CATALUÑA	413	3.97	1910	4.51
TOTAL		10403	100.00	42364	100.00

Tabla 6. Resultados preliminares del área susceptible para ser recargada de modo artificial de acuerdo con los distintos cruces de coberturas especificados distribuido por cuencas hidrográficas.

La cuenca más susceptible para operaciones de recarga artificial es la del Duero, dada su alta disponibilidad de agua frente a volúmenes excedentarios en las cuencas del sur peninsular. La siguen Ebro, Guadalquivir y Júcar por este orden, cuyas zonas susceptibles están supeditadas al caudal circulante en cauces fluviales de primer orden por lo general.

7 CONCLUSIONES

La recarga artificial de acuíferos (=AR o MAR) es una técnica de gestión hídrica de gran potencial muy escasamente utilizada en España. Hay un gran escepticismo sobre su valía y una escasa difusión hasta la fecha de sus posibilidades y limitaciones.

El nuevo Plan Hidrológico nacional, en su anexo 4, 2.3.f., menciona la intención de llevar a cabo una única actividad de recarga artificial de acuíferos en España con carácter inminente de iniciativa pública: "f) Regulación para recarga de los excedentes invernales del río Belcaire". Esta disposición reviste la idea de que la recarga artificial de acuíferos sigue estando en escasa consideración por los gestores hídricos del país.

Las circunstancias socio-económicas y políticas, así como el marco legal que regula la actividad, son idóneas en el momento actual para incluir este tipo de dispositivos en los nuevos esquemas de gestión hídrica.

En vista de que las sequías son procesos recurrentes en España durante todo el periodo cuaternario; sería conveniente dedicar el esfuerzo necesario en investigar, promocionar y construir nuevas técnicas y dispositivos de AR en aquellas ubicaciones donde resulte viable y conveniente.

El acercamiento de las nuevas investigaciones y su carácter aplicado debería ser presentado a los gestores hídricos del país, técnicos facultados para dar viabilidad a los proyectos de nuevos dispositivos, así como a la sociedad en general, con objeto de que la recarga artificial de acuíferos adquiera una mayor consideración en España. El análisis económico y la dimensión medioambiental de la técnica MAR refrendan su efectividad, su conveniencia y su buena adecuación a la realidad hídrica española del siglo XXI.

A pesar de su apariencia, excesivamente ecológica, se trata de una medida estructural, más “elegante” que la construcción de una presa o una balsa, si bien permite un margen de maniobra muy superior, al posibilitar la ocupación del terreno sobre el acuífero empleado para la recarga artificial, es más barata y hay quien aboga por el mayor valor contingente de los elementos asociados con respecto a las grandes obras hidráulicas. Esta técnica debe ser incorporada en esquemas de utilización conjunta complejos, ya que, por sí misma, difícilmente puede cubrir una fuerte garantía de suministro.

La recarga artificial de acuíferos no debe ser entendida como una técnica para controlar el medio, sino más bien como una herramienta para actuar en las consecuencias de unas actividades mal planificadas en el pasado y/o planificar otras en el futuro más afines al desarrollo sostenible.

En España hay grandes posibilidades de instalar nuevos dispositivos de recarga artificial de acuíferos en nuevas ubicaciones (según los primeros cálculos, aproximadamente un 8% del territorio nacional es susceptible a operaciones de AR). La cuenca más proclive es la del Duero, y las que menos las del norte, donde se registran mayores volúmenes de precipitación.

En cuanto a los aspectos cuantitativos, en la situación hídrica actual se considera posible y procedente “invertir” volúmenes procedentes de ríos para la regeneración de espacios de interés medioambiental, si bien está en tela de juicio si esta actividad podrá mantenerse en el tiempo en caso de mantenerse la sequía actual, agravada por problemas globales tales como la desertización, el cambio climático, etc. La polémica está servida.

8 AGRADECIMIENTOS

El autor desea manifestar su agradecimiento a Manuel López y Rodrigo Calero, del Grupo Tragsa, quienes han hecho posible el arranque del proyecto **DINA-MAR**, inscrito en el programa de I+D del Grupo con código 00/13.223. También a la decena de técnicos del equipo investigador y a Lorena Pérez.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, K. (1994). "Agua, economía y medio ambiente: interdependencias físicas y necesidades de nuevos conceptos". Revista de Estudios Agrosociales, 42-167.
- Armayor, J.L., de la Orden, J.A. y Murillo, J.M. (2001a). Artificial recharge as a technique to alleviate the overexploitation of small aquifers located on the Spanish mediterranean coast. In: Proceedings of the 3rd International conference Future Groundwater Resources at Risk. Ed. L. Ribeiro. Pp. 623-631
- Armayor, J.L., Murillo, J.M. y Martínez, R. (2001b). "Factores hidrometeorológicos y determinación de excedentes hídricos potencialmente utilizables en la operaciones de recarga artificial de acuíferos." Revista Hidropres de tecnología y gestión del agua nº 32. Diciembre de 2001.
- Armenter Ferrando, J.L. (2006). "La recarga artificial de acuíferos en la gestión conjunta de los recursos del río Llobregat." Agua y Ciudad en el ámbito mediterráneo (AQUAinMED). Memoria de las jornadas celebradas en Málaga del 24 al 28 de abril de 2006. Edita: IGME, serie hidrología y Aguas Subterráneas, nº 19.
- Arrojo, P. (2000). "Valoración de las aguas subterráneas en el marco económico general de la gestión de aguas en España." Papeles de Aguas Subterráneas (PAS), Serie B. Fundación Marcelino Botín.
- Barbieri, M. (2006). El proyecto GABARDINE y el estudio de recarga artificial de acuíferos mediante balsas de infiltración en el sitio piloto de El Papiol (Baix Llobregat). Universitat Politècnica de Catalunya.
- BOE. (1998). Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio, por el que se aprueban los Planes Hidrológicos de cuenca.
- BOE. (2001). Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. (BOE. n.º 161, de 6 de julio de 2001, corrección de errores BOE. n.º 184, de 5 de julio de 2001).
- BOE. (2002). Real Decreto 329/2002, de 5 de abril, por el que se aprueba el Plan Nacional de Regadíos (BOE núm. 101, de 27 de abril de 2002).
- BOE (2003). Resolución de 28 de enero de 2003, de la Secretaría General de Medio Ambiente, sobre la evaluación de impacto ambiental del proyecto de conducción y recarga del acuífero de S'Estremera, en Mallorca (Baleares), de la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. BOE 45/2003 de 28 de enero de 2003.
- BOE. (2005). Resolución de 7 de marzo de 2005, de la Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y del Cambio Climático, sobre la evaluación de impacto ambiental del proyecto «Recarga artificial de un pozo profundo en «La Cabaña» Campo de Pozos Canal del Oeste, en el término municipal de Pozuelo de Alarcón (Madrid)» del Canal de Isabel II en el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Tago. BOE 91/2005 de 16 de abril de 2005.
- BOR. (1981). "Proyecto de presas pequeñas (Design of small dams)." Bureau de Reclamation. Editorial Dossat. Madrid.
- Bouwer, H. (1999). "Artificial recharge of groundwater: systems, design, and management." In: Mays LW (Ed.) Hydraulic design handbook. McGraw-Hill, New York, pp 24.1–24.44
- Bouwer, H. (2002). "Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering." Hydrogeology Journal, volume 10, nº 2, abril 2002.
- Cano-Manuel, J. y González Ayestarán, R. (2000). "Las acequias de Sierra Nevada. Base de datos de las principales acequias de Sierra Nevada". Parque nacional de sierra Nevada. Organismo Autónomo de Parques Nacionales.
- CMMAD (1988). "Nuestro Futuro Común". Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo. Alianza Editorial, Madrid.
- CMR-UICN (2000). Represas y Desarrollo: Un Nuevo Marco para la Toma de Decisiones. Informe de la Comisión Mundial de Represas. Noviembre de 2000. <http://www.dams.org>
- Custodio, E y Llamas, M.R. (1983). "Hidrología Subterránea." Ed Omega. Barcelona. 2 vols: 1-2450.
- David G. Pyne, R. (1995). "Groundwater recharge and wells. A Guide to Aquifer Storage Recovery." Lewis Publishers. CRC Press. Boca Ratón, Florida, USA. 376 pp.

- David G. Pyne, R. (1998). "Aquifer storage recovery: Recent developments in the United States." Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al. (ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- De Bries, J. & Simmers, I. (2002). "Groundwater recharge: an overview of processes and challenges." Hydrogeology Journal Vol 10, nº 1. FEB 2002. AIH-SPRINGER.
- De la Orden, J.A. (2005). Estudio de la Recarga artificial en la Plana de Gandía-Denia. Diseño de una instalación a nivel industrial. Tesis doctoral. ETSI Minas. Universidad Politécnica de Madrid.
- De la Orden, J.A., (2006). Recursos hídricos no convencionales. I Curso de Hidrogeología Aplicada, Ilustre Colegio Oficial de Geólogos. Madrid.
- De La Orden, J.A., López-Geta, J.A. y Murillo, J.M. (2003). "Experiencias de recarga artificial de acuíferos realizadas por el IGME en acuíferos detríticos." Boletín Geológico y Minero. Volumen 114, nº 2, abril-junio de 2003. I.G.M.E- M.C.T.
- De los Cobos, G. (2002). "The aquifer recharge system of Geneva, Switzerland: a 20 year successful experience." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Díaz-Marta, M. (1989). "Esquema histórico de la ingeniería y la gestión del agua en España." Revista de OP nº 13, España y el Agua I. Otoño 1989 pg.8-23.
- Dillon, P.J. (1996). "Economics of ASR: System and users perspective." Aquifer Storage and Recovery. Centre for Groundwater Studies. Adelaide, Australia. 1-2 october, 1996.
- Esteller Alberich, M.V. (1993). "Consideraciones sobre el aprovechamiento de los recursos hídricos en la plana de Castellon. Utilizacion de aguas residuales para riego". Tesis doctoral. Fac. Ciencias. Universidad de Granada.
- EWRI-ASCE. (2001). "Water Resources Planning & Management." World Water Resources & Environmental Resources Congress. Orlando Florida. May 20-24, 2001. EURI-ASCE. American society of civil engineers. ASCE/EWRI Standards Committee for Artificial Recharge.
- Fernández Escalante, A.E., & López, J. (2002a). "Contribution to the hydrogeological knowledge of an artificial recharge area based on hydrochemical investigation. Los Arenales site, Duero basin, (Spain)." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Fernández Escalante, A.E., & López, J. (2002b). "Hydrogeological studies preceding artificial recharge of Los Arenales aquifer, Duero basin (Spain)". Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Fernández Escalante, A.E., (2002). "La recarga artificial en la Cubeta de Santiuste (Segovia) Estudio de las condiciones de referencia, funcionamiento hidrogeológico y aspectos medioambientales relacionados." Trabajo de aspiración a la Diplomatura de Estudios Avanzados. Dpto. de Geodinámica. Facultad de CC. Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. Trabajo no publicado.
- Fernández Escalante, A.E., y Cordero, R. (2002). "Los espacios naturales protegidos frente a la Directiva Marco del agua. Comentarios y proposiciones acerca de los estudios de impacto ambiental en los mismos". Jornadas técnicas sobre la gestión y el control del agua frente a la Directiva Marco. UAM.-CYII.
- Fernández Escalante, A.E. y García Rodríguez, M. (2004a). "Proposición de un sistema de caracterización de humedales degradados susceptibles de regeneración hídrica mediante operaciones de recarga artificial de acuíferos". VIII Simposio de Hidrogeología. El agua. Esencia ambiental. AEH-IGME. Octubre de 2004.
- Fernández Escalante, A.E. y García Rodríguez, M. (2004b). "Proposición de una clasificación de humedales en base a su susceptibilidad para ser restaurados mediante operaciones de recarga artificial de acuíferos. Aplicación al sistema de humedales de Coca-Olmedo". VIII Simposio de Hidrogeología. Zaragoza. AEH-IGME. Octubre de 2004.

- Fernández Escalante, A.E. y García Rodríguez, M. (2004c). "La recarga artificial de acuíferos. Marco legal que regula sus aplicaciones". VIII Simposio de Hidrogeología. AEH-IGME. Octubre de 2004.
- Fernández Escalante, A.E. (2005). "Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia)". Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Enero de 2005.
- Fernández Escalante, A.E., García, M. y Villarroja, F. (2005a). "The "careos" from Alpujarra (Granada, Spain), a historical example of artificial recharge previous to XIII century applicable to the XXI century. Characterization and inventory". ISMAR 5 proceedings. 5th International Symposium on management of aquifer recharge. Berlín, 2005 (12-16 june).
- Fernández Escalante, A.E., García, M. y Villarroja, F. (2005b). "Proposal for a system of environmental indicators to monitor and control artificial aquifers recharge operations based on case studies". ISMAR 5 proceedings. 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Berlín. June 2005.
- Fernández Escalante, A.E., García, M. y Villarroja, F. (2005c). "Proposal for a new classification of wetlands susceptible to recovery by means of artificial recharges of aquifers techniques. Application to the Coca-Olmedo wetlands complex, Duero basin (Spain)". ISMAR 5 proceedings. 5th International Symposium on management of aquifer recharge. Berlín, 2005 (12-16 june).
- Fernández Escalante, A.E., García, M. y Villarroja, F. (2005d). "Seguimiento y control de la restauración de humedales mediante técnicas de recarga artificial de acuíferos a partir del diseño de un sistema de indicadores medioambientales". Revista Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen III. Año 2005.
- Fernández Escalante, A.E., García Rodríguez, M., Villarroja Gil, F. y Montero Fernández, J. (2005e). "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". Revista Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen III. Año 2005. Universidad Alfonso X el Sabio. Escuela Politécnica Superior. Villanueva de la Cañada, (Madrid)
- Fernández Escalante, A.E., García, M. y Villarroja, F. (2006). "Las acequias de careo, un dispositivo pionero de recarga artificial de acuíferos en Sierra Nevada, España Caracterización e inventario". Revista Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen IV. Año 2006. Universidad Alfonso X el Sabio de Madrid.
- Fernández Escalante, A.E., Cordero Sánchez, R. (2006). "Esbozo de una estrategia para acercar la recarga artificial de acuíferos a la población mediante la educación ambiental". Revista ecosistemas, año XV, nº 1. Asociación española de ecología terrestre, Madrid.
- Fernández Escalante, A.E. y García Rodríguez, M. (2006). "Descripción de indicadores medioambientales para la evaluación de impacto ambiental, seguimiento y control de la restauración de humedales mediante técnicas de recarga artificial de acuíferos. (Segunda parte: indicadores de respuesta)". Revista Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen IV. Año 2006. Universidad Alfonso X el Sabio de Madrid. (EN PRENSA)
- Fernández Rubio, R. (2001). "Las aguas subterráneas en el Anteproyecto del Plan Hidrológico Nacional." Club Español del Medio Ambiente. Revista Tecnoambiente Nº 106 Año XI.
- Galán, R, Fernández Escalante, A.E. y Martínez, J. (2001). "Contribuciones al estudio hidrogeológico para la recarga artificial del acuífero de la Cubeta de Santiuste. (Segovia)." VII Simposio de hidrogeología, AEH, Murcia.
- Galán, R., López, F., Martínez, J., Macías, C., Galán, G. y Fernández Escalante, A.E. (2001a). "Recarga artificial del acuífero de los Arenales en la comarca de "El Carracillo" (Segovia). Soporte físico." VII Simposio de hidrogeología, AEH, Murcia.
- García-Hernán, O. (1996). "Investigaciones, ensayos y experimentaciones en la recarga artificial de acuíferos detríticos con baja permeabilidad. Lebrija (Sevilla)". Tesis doctoral. UCM, 1996.
- Green WH, Ampt GA. (1911). "Studies on soil physics, I. The flow of air and water through soils." J Agric Sci 4:1-24.

- Grischek, T., Madeleidt, W. & Nestler, W. (2002a). "River bed specifics and their effect on bank filtration efficiency." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Grischek, T., Schoenheinz, D. Worch, E. & Hiscock, K. (2002b). "Bank filtration in europe- an overview of aquifer conditions and hydraulic controls." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- Haeffner, H., Detay, M. & Bersillon, J.L. (1998). "Sustainable groundwater management using artificial recharge in Paris region." Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al. (ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- Hantke, H (1983). "Der Sickerschlitzenbau. Brunnenbau, Bau von Wasserwerken, und Rohrleitungsbau" (BBR): 34(6):207-208.
- Healy, R. & Cook, P. (2002). "Using groundwater levels to estimate recharge." Hydrogeology Journal Vol 10, nº 1. Feb 2002. AIH-Springer.
- IGME. (2000). "Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias." MCT.
- IRYDA. (1990). Proyecto de Asistencia Técnica para el Estudio Hidrogeológico de la Cubeta de Santiuste (Segovia)." Documento técnico no publicado. IRYDA-ITGE., 1990.
- ITGE. (1991). "Tecnología básica de la recarga artificial de acuíferos." Serie: Lucha contra la contaminación.
- ITGE. (2000a). "Recarga artificial de acuíferos." ITGE.-Exma.Dip. Provincial de Alicante.
- ITGE. (2000b). "Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias." ITGE. Ministerio de Ciencia y Tecnología (e.a. M.C.T).
- Laszlo, F. (2003). "The Hungarian Experience with Riverbank Filtration." Riverbank filtration: the future is now!. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
- Lerner, D.N. (1997). "Groundwater recharge." In: Saether OM, de Cariat P (editors). Geochemical Processes, weathering and groundwater recharge in catchments. AA Balkema, Rotterdam. Pp 109-150.
- Llamas Madurga, M.R. (2000). "Impacto del olvidado papel de las aguas subterráneas en la política del agua de España". Comentarios para la Comisión de Medio ambiente del Congreso de los Diputados en relación con la tramitación parlamentaria del Proyecto de Ley del plan Hidrológico Nacional. MIMAM. www.mma.es/secciones/agua/pdf/informesphncon/manuel_llamas_madurga.pdf
- Llamas Madurga, M.R. (2001). "Aguas subterráneas: retos y oportunidades." Fundación Marcelino Botín. Ediciones Mundi-prensa.
- López Geta, J.A. y Murillo Díaz, J.M. (1995). Recarga artificial de acuíferos. Experiencias realizadas por el Instituto Tecnológico Geominero de España. En: XI Congreso Latinoamericano de Geología. Venezuela.
- MAPA. (1999a). "Estudio hidrogeológico complementario para la recarga artificial en la cubeta de Santiuste (Segovia)." Informe técnico no publicado. Secretaría General de Desarrollo Rural-Tragsatec. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- MAPA. (1999b). "Anteproyecto de recarga del acuífero de la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia)." IRYDA.
- MAPA. (1999c). "Proyecto de recarga del acuífero de la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia)." Informe técnico no publicado. Secretaría General de Desarrollo Rural-Tragsatec.
- MAPA. (2000). "Proyecto de A.T. Gestión de los Recursos Hídricos del Acuífero de Los Arenales, Carracillo (Segovia)." Dirección General de Desarrollo Rural-TRAGSATEC (no publicado).

- MAPA. (2005a). "Asistencia técnica para el seguimiento y modelización de la recarga artificial en la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia)". Dirección General de Desarrollo Rural-TRAGSATEC (no publicado).
- MAPA. (2005b). "Asistencia Técnica para la gestión de los recursos hídricos en el acuífero de Los Arenales, comarca de "El Carracillo" (Segovia)" Dirección General de Desarrollo Rural-TRAGSATEC (no publicado).
- Martín-Alonso, J. (2003). "Combined Use of Surface Water and Groundwater for Drinking Water Production in the Barcelona Metropolitan Area." Riverbank filtration: the future is now!. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
- Menció, A., Mas-Pla, J. y Vilanova, E. (2003). "Análisis de las posibilidades de la recarga artificial de aguas residuales en el contexto hidrológico de la cuenca del río Onyar (Cuencas internas de Cataluña)." Presente y futuro del agua subterránea en España y la Directiva Marco del agua. Medidas de corrección. Zaragoza, 20-22 de noviembre de 2002. IGME.
- MIMAM. (2000b). "Libro Blanco del Agua en España 2000 (LBAE)." MIMAM. Madrid. 637 pp.
- MIMAM-MCYT (2000). "Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias". 57 pg.
- MIMAM. (2002). "Estudio del sistema de utilización conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de las cuencas del Cega-Pirón y del Adaja-Eresma." MIMAM-PROINTEC.
- Montgomery, H. (1987). "U.K. Experience in the ground water recharge of threatened sewage: Potential for irrigation purposes." Irrig. & Drainage Eng.
- MOPTMA-MINER (1994). "Libro Blanco de las Aguas Subterráneas (LBAS)." Serie Monografías. Secretaría General Técnica del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- Murillo Díaz, J.M. (2003). "recarga de acuíferos evaluación y análisis de condicionantes técnicos y económicos. Acuífero aluvial del bajo Guadalquivir". Tesis Doctoral. E.T.S.I. MINAS, Universidad Politécnica de Madrid.
- Murillo, J.M., de la Orden, J.A., Armador, J.L. y Castaño, S. (1999). La recarga artificial de acuíferos. IGME, Diputación provincial de Alicante.
- Murillo, J.M. (2000). "Recarga artificial de acuíferos o como introducir y almacenar agua en los acuíferos." Terralia. La revista independiente del medio rural. Año 4. nº 15. Junio de 2000.
- Murillo, J.M., de la Orden, J.A. y Rodríguez, L. (2001). "La recarga artificial como técnica de recuperación de acuíferos contaminados. Aplicación a la Plana de Vergel (Alicante)." IGME., 2001.
- Murillo, J.M., Durán, J.J., Orden, J.A. de la, López Geta, J.A. (2002). "Experiencia piloto de recarga artificial en el acuífero de Mitidja (Argelia)." Curso de recarga artificial de acuíferos." IGME.- Agencia Española de Cooperación Internacional. Técnicas Hidrogeológicas y de Servicio.
- Olsthoorn, T.N. & Mosch, M.J. (2002). "Fifty years artificial recharge in the Amsterdam dune area." Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- OMS. (1989). "Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en Agricultura y Acuicultura." Informe de un Grupo Científico de la Organización Mundial de la Salud (e.a. OMS.). Ginebra 1989. Serie de Informes Técnicos 778. [en <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind53/dis/dis.html>].
- Pachón, D, Martín Machuca, M., Murillo, J.M., López-Geta, J.A. (2001). "La instalación piloto de recarga artificial de "Los Sotillos" (Cádiz)". V Simposio sobre el agua en Andalucía, Almería, 25 - 28 de septiembre 2001. Vol. 1.
- Pavelic, P., & P. Dillon. (1996). "The impact of two seasons of stormwater injection on groundwater quality in South Australia." Proc. of the Internat. Symp. on Artificial Recharge of Groundwater (Helsinki, Finland): 105-110. Edited by A-L. Kivimaki and T. Suokko.
- Pérez-Paricio, A. (1999). "Site description Cornellà, Spain." Proyecto Europeo de Recarga Artificial de Acuíferos. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona.

- Pérez-Paricio, A. (2000). "Integrated modelling of clogging of artificial recharge systems." Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Pérez-Paricio, A., Benet, I., Ayora, C., Saaltink, M. y Carrera, J. (2000b). "CLOG: A code to address the clogging of Artificial Recharge systems." Simposio internacional: Computer Methods for Engineering in Porous Media, Flow and Transport, 28/9 al 1/10 de 1998. Giens (Francia). Ed.: J.M. Crolet.
- Rubio, J.C., Gollonet, J., Gonzalez-Ramón, A., Luque, J.A. (1995). Resultados de la experiencia de recarga artificial seguida por el ITGE en el acuífero de Mancha Real. En: IV Simposio nacional de Hidrogeología. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, vol. XXI. Pp. 147-157.
- Salgot de Margay, M. (1980). "Estudio acerca de la posibilidad de reutilización de las aguas residuales depuradas de la Costa Brava, Gerona". Tesis doctoral. Facultad de Farmacia, Universidad de Barcelona.
- Sandlund, O.T., & Viken, Å. (Eds.) (1997). "Report from Workshop on Freshwater Biodiversity." Selbu, Norway, 5.-7. June 1997. The Trondheim Conferences on Biodiversity.
- Silgado, A., Román, J, Martín, M. y Mantecón, R. (2002). "Uso eficiente del agua en cuencas optimización de la gestión de los recursos hidráulicos mediante la recarga artificial. Experiencias en la cuenca del Guadalquivir." Internet: <http://www.unesco.org>.
- Sophocleous, M. (2002). "Interactions between groundwater and surface water: the state of the science." Hydrogeology Journal Vol 10, nº 1. Feb 2002. AIH-Springer.
- Tuinhof, A & Heederik, J.P. eds. (2002). "Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage. Making Better Use of Our Largest Reservoir." Papers of Seminar Wageningen. 18 - 19 December 2002. Netherlands National Committee for the IAH in cooperation with Netherlands Hydrological Society.
- Tuinhof, A, Olsthoorn, T., Heederik, J.P. & de Vries, J. (2004). "Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage. A promising option to cope with increasing needs." Netherlands National Committee for the IAH in cooperation with Netherlands Hydrological Society.
- UPV (2001). Aquatool. Sistema soporte de decisión para la planificación y gestión de recursos hídricos. UPV, 2001. www.upv.es/aquatool/.
- Valdés, J.L. (1992). "Experiencias de recarga artificial en los acuíferos del Río Llobregat y Río Besòs." Aguas de Barcelona (AGBAR), Barcelona
- Veihmeyer, F.J. & Hendrickson, A.J. (1931). "The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils." Soil Science 32:181-194.
- Villarroja, F. (2002). "El marco de la Directiva Marco." Jornadas técnicas sobre la gestión y el control del agua frente a la Directiva Marco. UAM-CY-II.
- Winter, T.C., Harvey J.W., Franke, O.L., Alley, W.M. (1998). "Groundwater and surface water. A single resource." US Geological Survey. Circ 1139.
- <http://www.cgwaindia.com/success.htm>
- http://www.earthetc.com/ecwearth/asps/ecwearth_frame.asp?Image=geodetic/world/landsat742
- <http://www.iah.org/recharge>
- <http://www.csir.co.za>, 2002
- <http://www.dams.org/report/>
- <http://www.mcu.es/TESEO/teseo.html>
- aguas.igme.es/igme/publica/libro47/lib47.htm
- www.h2ogeo.upc.es/seminarios/2006/Manuela%20Barbieri%2026_01_2006.pdf
- http://www.wwf.es/aguas_politica_phn.php