Innovación en la Planificación y Gestión del Agua

El Grupo Tragsa y la Recarga Gestionada de Acuíferos

GrupoTragsa
Garantía Profesional. Servicio Público

30 Aniversario Tragsatec 1990-2020

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

SEPI

Innovación en la Planificación y Gestión del Agua. El Grupo Tragsa y la Recarga Gestionada de Acuíferos.

Autor: Grupo Tragsa

Edita: Empresa de Transformación Agraria, S.A., S.M.E., M.P. (Tragsa)
Sede social: Maldonado, 58 - 28006 Madrid

Coordinadores:
Enrique Fernández Escalante. Dr. en Hidrogeología, Subdirección de Innovación y Desarrollo de Servicios del Grupo Tragsa
Jon San Sebastián Sauto. Dr. en Biología, Gerencia de Ingeniería y Edificación de Tragsatec

Colaboradores:
Rodrigo Calero Gil. Ingeniero Agrónomo, Jefe de Departamento de la Subdirección de Innovación y Desarrollo de Servicios del Grupo Tragsa
Rocío Ortega Labrandero. Ingeniero Agrónomo, Gerente de Planificación y Transferencia Tecnológica de la Subdirección de Innovación y Desarrollo de Servicios del Grupo Tragsa

Contacto:
Subdirección de Innovación y Desarrollo de Servicios del Grupo Tragsa
imasd@tragsa.es

Diseño y maquetación: Alberto Azpeitia Muñoz, Subdirección de Coordinación y Comunicación del Grupo Tragsa

Innovación en la Planificación y Gestión del Agua

El Grupo Tragsa y la Recarga Gestionada de Acuíferos

Grupo Tragsa
Garantía Profesional. Servicio Público

Pozo de recarga artificial en el canal del Guadiana promovido por la CHG.

Índice

Prólogo 5

1. Introducción. El Grupo Tragsa apuesta por la innovación en la gestión del agua 7

2. La recarga gestionada o artificial de acuíferos. ¿Cómo funciona esta técnica? 8

3. Ventajas e inconvenientes de la técnica MAR 9

Comparativa con otras técnicas de gestión hídrica 10
Acuíferos susceptibles de ser recargados 12
Conclusiones 12

4. Gestión de la recarga y cambio climático. Una amenaza severa que nos ha unido a todos 15

5. La recarga gestionada de los acuíferos en una aproximación descendente 16

Contexto internacional 16
Contexto nacional 18
Experiencia del Grupo Tragsa 18

6. Dispositivos de recarga y soluciones tecnológicas MARSOL 20

Dispositivos de recarga 20
Calidad del agua a recargar 22
Soluciones tecnológicas 24

7. Beneficiarios: ¿cuánta gente puede beneficiarse y participar de la recarga? 26

Uso industrial. Principales sectores demandantes 26
Mejoras medioambientales 27

8. Servicios que el Grupo Tragsa puede ofrecer 29

Localización de la formaciones geológicas más idóneas para la recarga 29
(Ante)proyectos de dispositivos de recarga 29
Obra de dispositivos de recarga 30
Implementación de redes de control 30
Monitoreo y seguimiento 30
Formación y talleres de capacitación 32
Expectativas de futuro conforme a los planes hidrológicos de cuenca 32
Campañas de difusión y acciones de sensibilización 34
Gestión hídrica en "zonas MAR" 34

9. Ventajas competitivas 35

Multifuncionalidad 35
Diversificación de las fuentes de toma 35
Integración en el planeamiento y en la ordenación territorial 37

10. Estrategia del Grupo Tragsa en la recarga gestionada de acuíferos 39

Expertise del Grupo 39
Servicio público indispensable y medio propio 39
Responsabilidad social 40
Seguimiento de los trabajos previos 40

11. Vínculos con otras actividades nacionales e internacionales 41

IAH-MAR Commission 41
Relación con la industria y beneficiarios potenciales del GT *MAR to MAR-k€t* 41
Marca España Agua 42
Contribución a tareas de diseminación y demostración de nuestras capacidades (ISMAR10) 42

12. Resumen. La recarga gestionada como línea de acción del Grupo Tragsa 43

Producto real… 43
… De aplicación internacional 43
… Y con visión de futuro 43

La recarga gestionada ha sido una técnica pionera en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel.

Prólogo

La gestión y la calidad de las aguas son temas situados en la vanguardia de los principales retos que se nos plantean y, lógicamente, forman parte de los objetivos estratégicos y de la actividad habitual del Grupo Tragsa.

Desde hace décadas, el Grupo Tragsa es referente en materia de gestión hídrica y aporta soluciones innovadoras en el marco de la sostenibilidad, empleando "técnicas de gestión especiales o alternativas", como es el caso de la recarga gestionada de acuíferos, tradicionalmente llamada "recarga artificial". Los proyectos más destacados en este ámbito son los llevados a cabo en el acuífero Los Arenales y en el Canal del Guadiana, gracias a la confianza que han depositado las Confederaciones Hidrográficas en nosotros.

Complementando estas actividades productivas, hemos realizado un importante esfuerzo de innovación en esta línea, llegando a demostrar que se trata de una de las tecnologías capaces de combatir frontalmente los efectos adversos del cambio climático, puesto que España cuenta con importantes potenciales reservorios de agua subterránea. Estos reservorios podrían ser empleados de forma interanual, o como reservas estratégicas en años de mayor necesidad.

El Grupo Tragsa organizó el X Congreso Internacional de Recarga Gestionada de Acuíferos *(International Symposium on Managed Aquifer Recharge,* ISMAR 10), celebrado en Madrid en mayo de 2019, donde participaron 280 expertos de 58 países para compartir los últimos avances en esta técnica.

Esta publicación recopila nuestro saber hacer, el estado de la técnica y su idoneidad para el actual contexto medioambiental global, así como las acciones de recarga que tienen previstas los distintos organismos de cuenca en los planes hidrológicos actualmente vigentes.

Espero y deseo que la información aquí presentada resulte de utilidad, y con ello podamos aportar nuestro granito de arena en este gran reto y contribuir al avance de la Agenda 2030, a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y al VIII Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO.

Agradezco una vez más a las Administraciones Públicas su confianza y reitero que el Grupo Tragsa es y será garantía de calidad y servicio público.

Jesús Casas Grande
Presidente del Grupo Tragsa

Recarga gestionada o artificial en el canal del Guadiana.

1. Introducción. El Grupo Tragsa apuesta por la innovación en la gestión del agua

El Grupo Tragsa cuenta con una dilatada trayectoria en la planificación y gestión de los recursos hídricos, contando con 40 años de experiencia, por lo general apoyando a las Administraciones Públicas. Aparte de la puesta en marcha de proyectos y obras de infraestructura hidráulica, desarrolla de manera habitual actuaciones para su gestión y mantenimiento, así como brinda apoyo permanente a las Confederaciones Hidrográficas.

El escenario climático actual, con periodos de sequía cada vez más acusados, distribución muy irregular de las precipitaciones y la creciente escasez de agua en el arco mediterráneo, ha suscitado una amplia preocupación social y de las Administraciones Públicas, y una apuesta decidida por la aplicación de soluciones innovadoras en la gestión hídrica. Entre todos los componentes del ciclo integral del agua, se ha prestado una especial atención en la línea de acción "recarga gestionada de acuíferos", punto focal de esta publicación.

En este contexto, el Grupo ha contribuido, en alguna medida en sus 40 años de historia, a la realización de, al menos, 20 dispositivos relacionados con la recarga intencionada de agua en los acuíferos del territorio nacional.

Estas actuaciones han permitido la creación de un grupo de especialistas en materia de recarga gestionada, con capacidad para intervenir en todas las fases del ciclo del agua.

Como complemento a la formación y desarrollo de capacidades de varios departamentos del Grupo, se han financiado y desarrollado al menos cuatro proyectos específicos de I+D+i focalizados en la recarga gestionada: RECACUIF 2006-7, DINA-MAR 2009-11, MARSOL 2014-16 y MARSolut 2019-22. La actividad en esta línea de acción es, por tanto, intensa, ya que estos proyectos han permitido, además, avanzar en la propuesta de soluciones tecnológicas y afinar en el diseño de los elementos de obra de eficiencia creciente.

El conocimiento en la materia ha aumentado considerablemente tras la organización y celebración del 10º Congreso Internacional de recarga gestionada de acuíferos (ISMAR 10), celebrado en Madrid entre los días 20 y 24 de mayo de 2019 y con presencia de 280 delegados de 58 países (www.ismar10.net).

Esta publicación tiene por objeto dar a conocer algunos de los principales avances. Para ello se considera preciso esbozar las generalidades de la técnica *Managing Aquifer Recharge* (MAR), explicar en qué consiste y cómo funciona, y aumentar progresivamente la complejidad, terminando por exponer las soluciones tecnológicas alcanzadas.

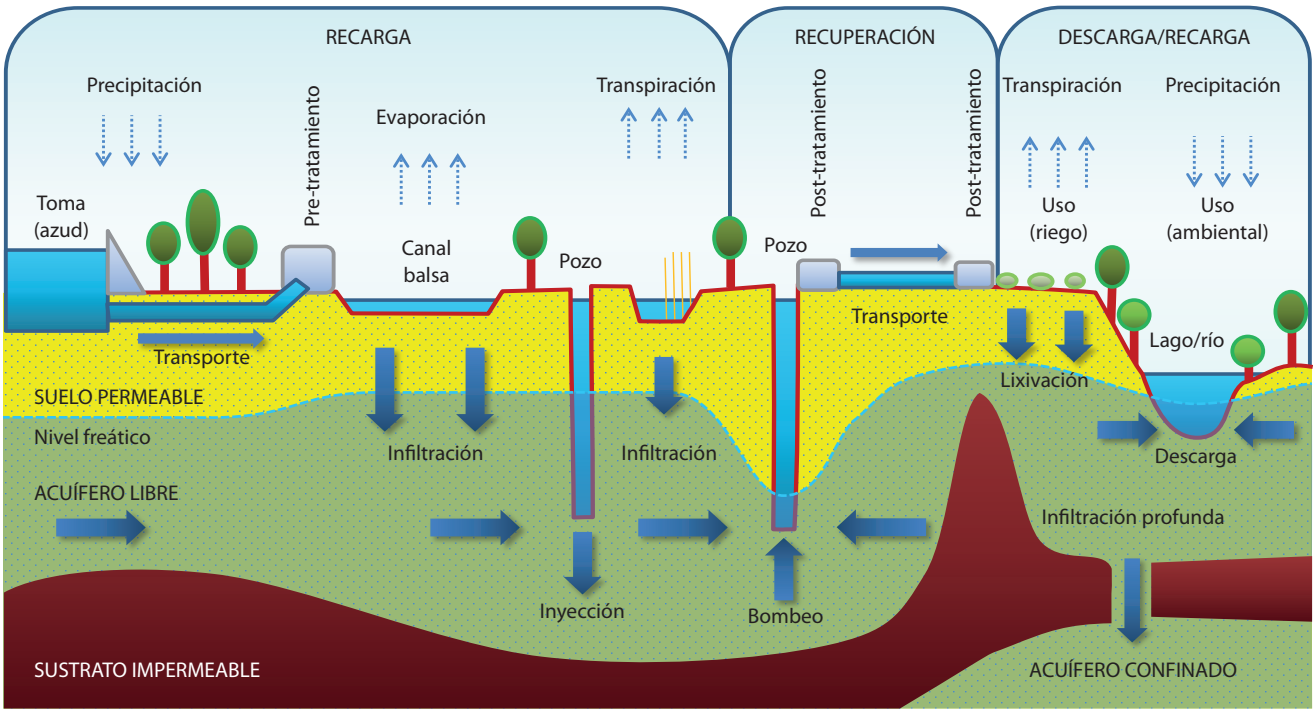


Figura 1. Esquema y geolocalización de algunos procesos de hidrogeología y gestión hídrica.

2. La recarga gestionada o artificial de acuíferos. ¿Cómo funciona esta técnica?

La recarga gestionada de acuíferos o *Managed Aquifer Recharge* (MAR) es un método de gestión hídrica que permite introducir de manera intencionada agua en los acuíferos subterráneos (en general, agua de buena calidad y pretratada). Una vez almacenada en estos, puede ser extraída para distintos usos (abastecimiento, riego, frenar la intrusión marina, reducir la contaminación, regenerar ecosistemas, etc.) mediante pozos o sondeos.

El agua puede proceder de ríos, depuradoras, escorrentía urbana, desaladoras o humedales, entre otros orígenes; y es introducida al acuífero mediante diversos dispositivos tales como zanjas, balsas o pozas (técnica más frecuente en el mundo), canales (segundo dispositivo más empleado), pozos, sondeos de inyección, etc.

La actividad se lleva a cabo generalmente en invierno o en la época lluviosa, cuando hay excedentes hídricos (sistema intermitente, ocasional o de oportunidad); aunque hay dispositivos permanentes o 24-7 si la disponibilidad de agua es continua (depuradoras).

Esta agua es almacenada en el acuífero adicionalmente a la recarga natural, y sigue su circuito subterráneo, homogeneizando su composición *in itinere* a la vez que se "naturaliza" durante un periodo de tiempo variable. Más tarde es extraída y empleada para diferentes usos, como abastecimiento y regadío, generalmente con una calidad mejorada y con altas garantías de seguridad.

La recarga gestionada de acuíferos es un método de gestión hídrica que permite introducir de manera intencionada agua en los acuíferos subterráneos.

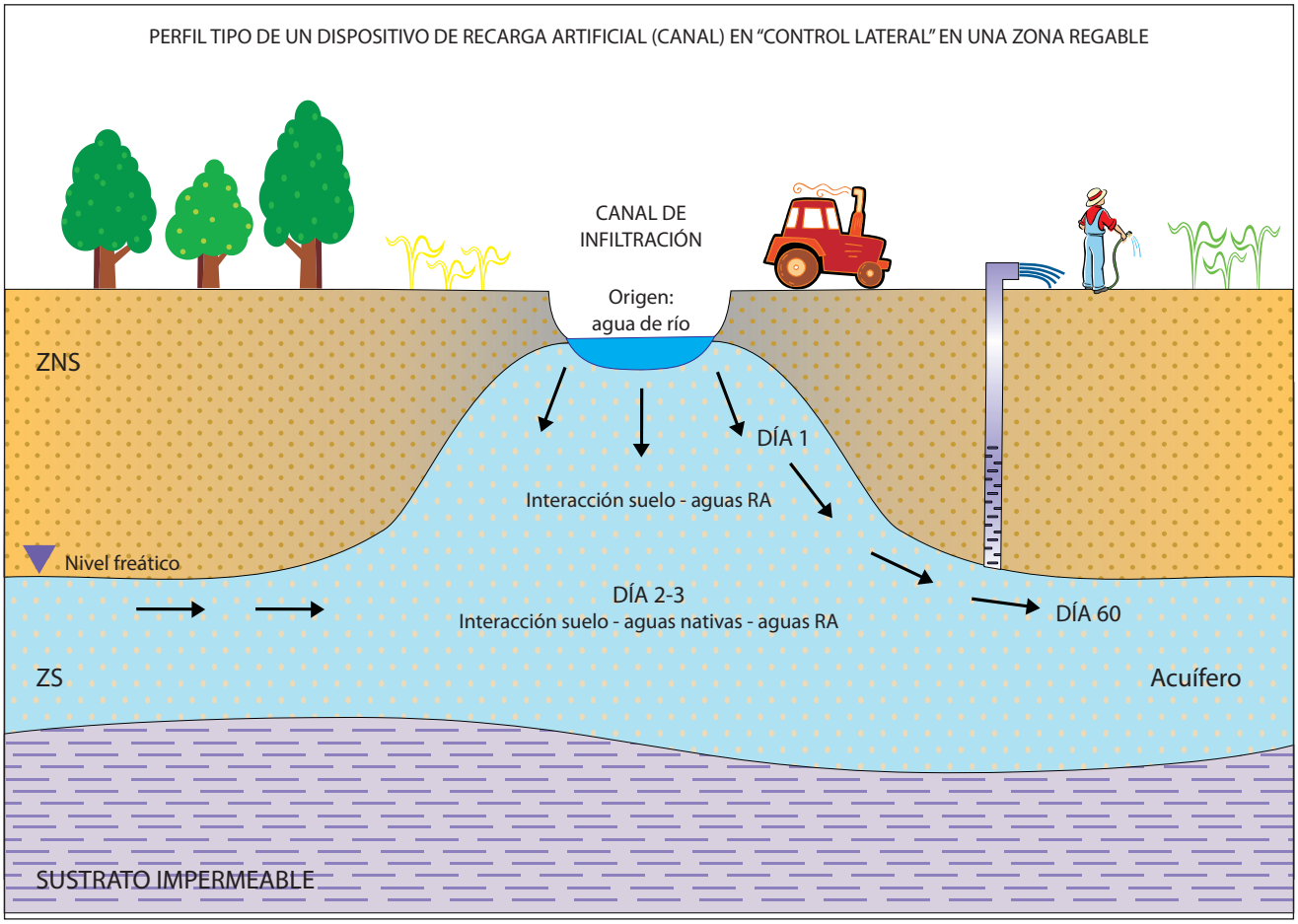


Figura 2. Definición del término "recarga artificial" tomado de la Wikipedia (redactada y publicada por los técnicos de DINA-MAR en 2008).

3. Ventajas e inconvenientes de la técnica MAR

Las técnicas MAR son consideradas una alternativa de gestión hídrica de primer orden en varios países del mundo, mientras que en otros se considera una técnica "especial", y suscita un cierto escepticismo a pesar de su gran potencial. A modo de ejemplo cabe destacar que se han inventariado más de 500 dispositivos y experiencias distribuidos en Europa.

Entre las ventajas de la técnica MAR 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.
- Eliminación de patógenos, sustancias químicas, etc. del agua durante el proceso de infiltración a través del suelo y su posterior residencia en el acuífero, suavizando diferencias cualitativas y reduciendo riesgos medioambientales, incluidos aquellos relacionados con la ecotoxicología y la salud.
- Utilización del acuífero como embalse regulador, almacén y red de distribución dentro de un sistema integrado, permitiendo suavizar fluctuaciones en la demanda y reducir el descenso del nivel del agua por sobre-bombeo con mínimo impacto ambiental.
- Reducir las pérdidas por evaporación respecto al agua embalsada en reservorios superficiales y compensar la pérdida de recarga natural en ciertos acuíferos que funcionan en régimen afectado debido a ciertas actividades antrópicas.
- Introducir sistemas de gestión hídrica paliativa mediante la recarga gestionada (= artificial) en cabeceras de cuenca y zonas forestales, comenzando a laminar una avenida potencial "ladera abajo".
- Integración de actividades lesivas en el marco del desarrollo sostenible, tales como el tendido de barreras hidráulicas para evitar o combatir la intrusión marina, la prevención de problemas geotécnicos, la reutilización (o reúso) de aguas regeneradas urbanas, la regeneración hídrica de humedales, recuperación de manantiales y otros elementos clave, etc.
- Mejora económica de zonas deprimidas, retrasando el despoblamiento en áreas rurales, creación de empleo, aumento de la capacidad agrícola productiva, etc.
- Intervención para aminorar la desertización, paliar efectos adversos del cambio climático mediante una técnica que lo combate frontalmente, reducir la erosión, etc.
- Disponer de recursos hídricos estratégicos almacenados en un entorno seguro para situaciones de escasez de agua o sequía.
- Derivar volúmenes excedentarios durante inundaciones y avenidas para su almacenamiento temporal como medida de seguridad, y de gestión de eventos climáticos extremos.

Entre los inconvenientes y factores limitantes para su aplicación, cabe destacar:

- Grado de conocimiento incipiente de su potencial.
- Desinterés institucional por la visión principalmente hidráulica de la política de gestión hídrica en España (y en otros países), que consideran a la recarga gestionada (=artificial) una "técnica especial" o "alternativa".
- Escasez y falta de continuidad en las experiencias, que van cobrando importancia creciente. En España su bagaje histórico reciente apenas excede los 40 años, lo que puede interpretarse como una operación de cierto riesgo para algunos inversores, siendo considerada en algunos planes hidrológicos de cuenca, poco amigables con esta técnica, una presión, e incluso un vertido.
- Escasa dedicación hasta la fecha en las publicaciones de gestión hídrica del país, como los Libros Blancos de las aguas, si bien su grado de difusión es creciente.

Figura 3. Regeneración hídrica de humedales degradados mediante sondeos de recarga artificial. Parque Nacional de las Tablas de Daimiel, Ciudad Real.

- Falta de estudios de viabilidad, por lo que es preciso realizar varios estudios y proyectos para minimizar los riesgos e impactos ambientales previamente a la construcción de dispositivos, lo que conlleva unos ciertos costes, en ocasiones superiores a la propia obra.
- Existe el peligro de colmatar los acuíferos en las proximidades de los puntos de recarga si el agua utilizada no es previamente tratada de manera adecuada, por ejemplo mediante una decantación previa. Para ello es preciso un control durante el diseño y construcción, así como planificar y llevar a cabo un programa de vigilancia y control ambiental, evaluando los impactos diferidos y a largo plazo.
- Algunas experiencias han sido financiadas con proyectos de I+D, generalmente pilotos de pequeña escala, que son abandonados cuando termina el proyecto (y su presupuesto), lo que daña seriamente la efectividad de la técnica por efecto de una falta de previsión de los inversores y difunde un mal ejemplo debido al abandono de infraestructuras que funcionaban adecuadamente.

Comparativa con otras técnicas de gestión hídrica

En España, la mayoría de las experiencias de mayor escala fueron construidas con carácter experimental, con escasos dispositivos operativos de gran envergadura, ubicados en Castilla y León, Cataluña, Madrid y Castilla-La Mancha.

La cifra de agua recargada de manera intencionada a los acuíferos oscila, según las fuentes, desde 50 hm^3/año (IGME 2000) hasta 350 hm^3/año (LBAE, MIMAM, 2000), 380 hm^3/año (DINA-MAR, 2010), cifras que, aún en el mayor de los casos, representan un volumen del orden de 10 veces inferior a países de Europa Central como Alemania. Tal diferencia numérica es debida a haber tenido en consideración o no durante el cálculo, los dispositivos ubicados en áreas forestales para la gestión hídrica paliativa.

En España la infiltración intencionada de agua desde diques de laminación y recarga excede el volumen total publicado en las distintas referencias. Estos diques fueron construidos en su mayoría por el Instituto para la Reforma y el Desarrollo Agrario (IRYDA) y el Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) desde la década de los 50, y actualmente están siendo inventariados.

A este respecto, falta por incluir en los cálculos la infiltración que se lleva a cabo por el fondo de las grandes presas, que en España pueden llegar a alcanzar la cifra de 1.400 hm^3/año. Un volumen adicional debe ser evaluado al considerar los elementos de retorno existentes en zonas urbanas.

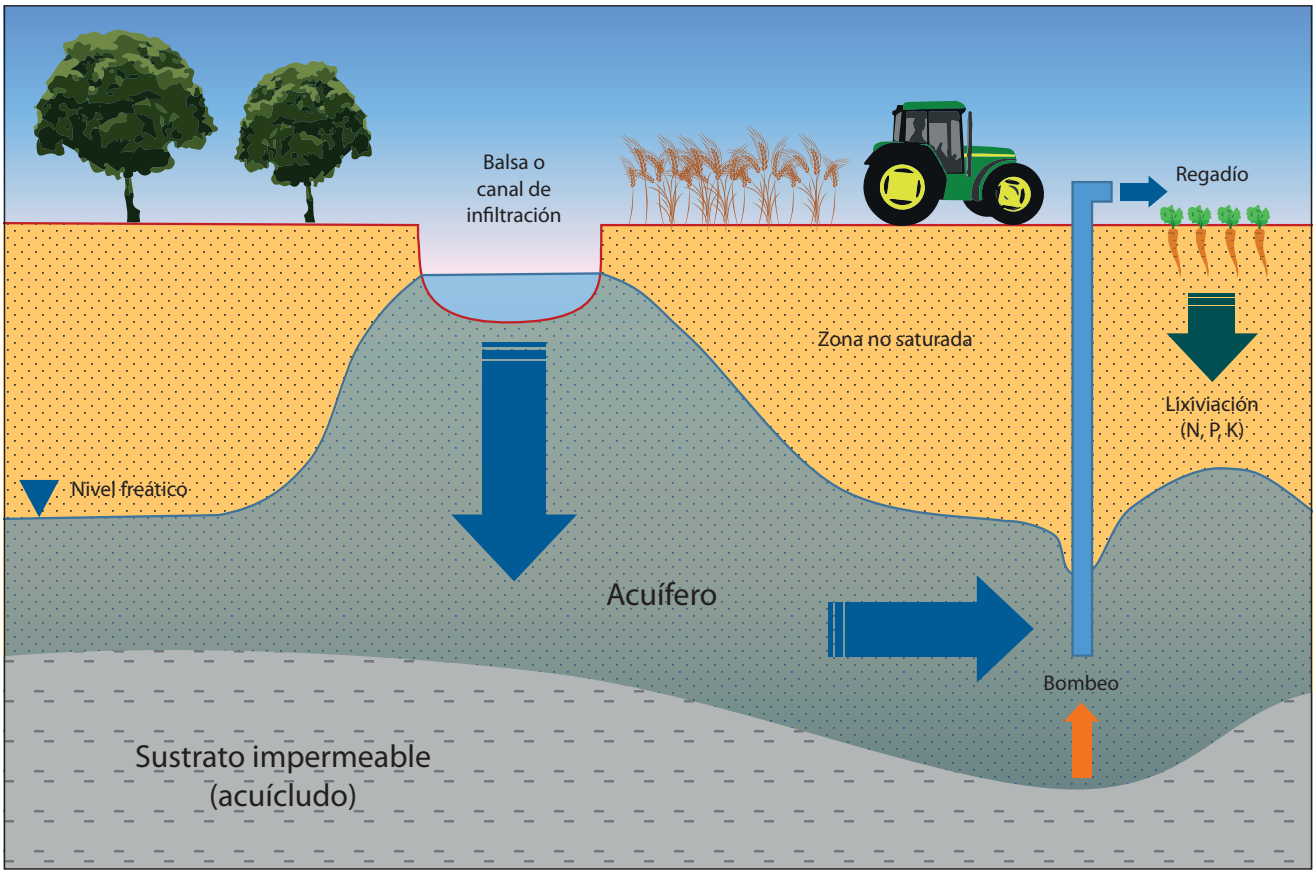


Figura 4. La lixiviación de N, P y K y movilización desde la zona no saturada hacia el agua subterránea es uno de los impactos de la recarga gestionada en una zona regable.

De este modo es posible estimar, de manera realista, un volumen de recarga "artificial", intencionado o no, de hasta 800 hm^3/año, cifra alejada del volumen publicado en las referencias mencionadas, y que representa un 10 % del porcentaje extraído de los acuíferos para distintos usos en el país. También queda alejada de la capacidad de almacenamiento superficial de España, que asciende a unos 54.000 hm^3 (quinto país del mundo en capacidad de almacenamiento superficial y primero de Europa).

De todos los puntos de vista posibles para fomentar la técnica MAR e integrarla en esquemas conjuntos con obras hidráulicas "duras", el más relevante es el económico. En un primer estudio (las referencias bibliográficas específicas son escasas), que concluyó que el agua procedente de la gestión de la recarga de acuíferos (MAR) tiene unos costes en torno a un 30 % por debajo del coste medio del agua desalada, y en torno al 50 % de la embalsada en presas y balsas (DINA-MAR, 2010; a partir de datos numéricos de obras de Tragsa distribuidas por todo el territorio nacional). Esto es debido a que los dispositivos de recarga son mucho menos costosos que las grandes obras hidráulicas de almacenamiento superficial. Además, en ciertas ocasiones, incrementan el volumen almacenado bajo tierra en zonas en las que no es viable aplicar otras técnicas de gestión hídrica que garanticen el suministro.

Figura 5. Diques de laminación de avenidas en cabecera de cuenca que provocan una recarga simultánea en el acuífero. La mayor parte del volumen recargado en España se debe a este tipo de diques.

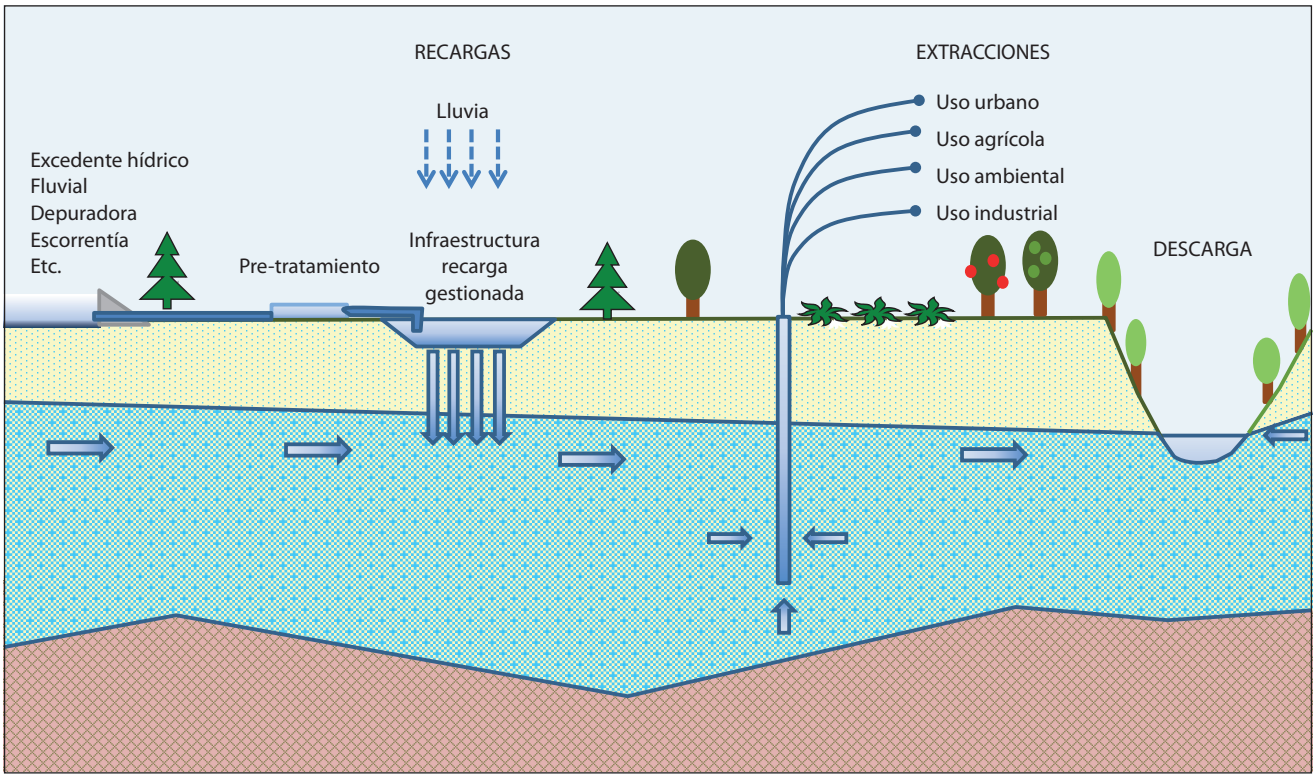


Figura 6. Algunos de los usos más habituales de los recursos hídricos almacenados mediante técnicas de recarga gestionada.

Acuíferos susceptibles de ser recargados

Los condicionantes a tener en cuenta en una zona de recarga gestionada tipo, según la finalidad específica de la recarga, son las siguientes:

- Acuíferos sobre-explotados que deben ser realimentados:
  - Zona con intensa explotación agrícola o zona que suscite un determinado interés medioambiental.
  - Acuíferos con intensa extracción para usos potables.
  - Zonas con un incremento de extracción previsto para el futuro, ya sea programado o espontáneo (por ejemplo: crecimiento demográfico en una ciudad o pueblo cuyo sistema de abastecimiento de agua potable esté alimentado desde acuíferos; ampliación de la superficie agrícola con parcelas abastecidas con aguas subterráneas; etc.).
- Acuíferos que muestran una progresiva degradación de la calidad del agua:
  - Zonas con elevadas concentraciones de nitratos.
  - Zonas con valores medioambientales deteriorados o en peligro de desaparición.
  - Zonas con problemas de intrusión salina continental o marina (acuíferos costeros).
- Acuíferos en zonas donde la disponibilidad de aguas superficiales muestra una marcada variación estacional:
  - Disponibilidad de agua superficial excedentaria durante algunos meses del año.
  - Zonas donde se puede combinar la recarga gestionada de acuíferos con el manejo de excedentes (control de avenidas, etc.).

Conclusiones

La recarga gestionada o artificial de acuíferos (MAR) es una técnica de gestión hídrica de gran potencial muy poco utilizada en España. Hay un gran escepticismo sobre su valor y una escasa difusión hasta la fecha. Así mismo sigue estando escasamente considerada por los gestores hídricos del país. No obstante, su grado de implantación es creciente y las experiencias con continuidad están arrojando resultados positivos.

Las circunstancias socio-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 mejorados de gestión hídrica. Por otro lado, las circunstancias económicas se aproximan a las deseables, a pesar de ser dispositivos de bajo coste y que el ratio coste/beneficio disminuye a medida que prospera el estado de la técnica.

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. Esta práctica no debe ser entendida como una herramienta para controlar el medio físico, sino como un instrumento para actuar contra el efecto de unas actividades mal planificadas en el pasado y para planificar otras más afines con el desarrollo sostenible del futuro.

Se trata de una medida estructural, quizás más "elegante" que la construcción de una presa o una balsa, pero ciertamente más ecológica, que permite un margen de maniobra muy superior (el terreno sobre el acuífero almacén puede ser empleado para distintos usos, como cultivos, al contrario que un pantano o balsa). También representa un ahorro de costes para rendimientos equivalentes a los de las grandes infraestructuras hidráulicas. Además es una tecnología contrastada, real, segura y viable. Hay también quien aboga por su alto "valor contingente".

Figura 7. Llegada del agua fluvial a dos balsas de infiltración en el acuífero de Los Arenales. Válvulas de disipación de energía.

La técnica debe ser incorporada en esquemas de utilización conjunta complejos, ya que, por sí misma, difícilmente puede cubrir una fuerte garantía de suministro en períodos plurianuales.

En España hay grandes posibilidades de instalar nuevos dispositivos de recarga gestionada de acuíferos, según se ha indicado con anterioridad. En el contexto actual, hay numerosas experiencias positivas de restauración o regeneración de espacios de interés medioambiental mediante préstamos de volúmenes discretos procedentes de ríos.

No obstante, estas actividades adolecen de garantizar su continuidad en el tiempo en caso de sequías prolongadas, cuyos efectos resultan agravados por la desertización, el cambio climático, la crisis económica y otros problemas globales.

La técnica se ha convertido en una manera de encarar "frontalmente" los efectos adversos del cambio climático y permitir el almacenamiento de agua como recurso estratégico para afrontar situaciones de escasez de agua y de sequía. Además, permite detener y aprovechar una fracción de los caudales de concentración de las avenidas e inundaciones.

Figura 8. Dispositivo de recarga gestionada construido por el Grupo Tragsa para la regeneración hídrica de un humedal. Laguna de la Iglesia, Villagonzalo de Coca, Segovia.

Nota: parte del texto de este apartado con la definición de la Wikipedia para "recarga artificial" se reproduce en derecho, ya que fue inicialmente redactado por autores del Grupo Tragsa en 2008.

°C
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
°F
120
100
80
60
40
20
0
-20

4. Gestión de la recarga y cambio climático. Una amenaza severa que nos ha unido a todos

Los efectos adversos del cambio climático dibujan un panorama desolador a medio-largo plazo en el arco mediterráneo. Dentro de las medidas de prevención y mitigación, numerosos países están analizando la posibilidad de contar con reservas de agua estratégicas para afrontar los escenarios de escasez. Los sistemas de alarma y los Planes de sequía confirman el panorama venidero. En esta situación, resulta necesario implementar actuaciones preventivas y crear las infraestructuras necesarias para el almacenamiento de volúmenes importantes de agua, que permitan afrontar situaciones duraderas de escasez de agua y que reduzcan el efecto negativo de las sequías sobre la economía y el medio ambiente.

Entre todas las técnicas de gestión hídrica, tanto convencionales como alternativas, el almacenamiento intencionado de agua en los acuíferos, o recarga gestionada, se considera uno de los métodos más eficientes para luchar frontalmente contra los efectos del cambio climático. En este contexto, varios países, incluyendo aquellos en vías de desarrollo, están implementando técnicas de "cultivo de agua", por lo general en la cabecera de las cuencas y asociadas a actividades de forestación, para la retención y preservación de la cubierta vegetal.

Los almacenamientos son naturales, requiriendo tan sólo su localización en el subsuelo. Los volúmenes almacenados quedan además protegidos de la evaporación, y su calidad preservada y alejada de focos contaminantes y de elementos susceptibles de malograr la calidad de las aguas, utilizando a los acuíferos como un medio receptor, y a su vez, con un sistema de depuración natural de las aguas. Esta metodología, aunque estructural, es considerada de bajo coste con respecto a las grandes obras hidráulicas.

La técnica que nos ocupa es considerada, además, una fuerza motriz o *Driving Force* (CE, 2001, informe IMPRESS), es decir, capacitada para influir directamente tanto en la cantidad como en la calidad de las masas de agua donde se aplica.

También es frecuente el desarrollo de sistemas de cultivo de agua en el entorno urbano, mediante Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, o SUDS, en los que el Grupo ha alcanzado un alto nivel de especialización. A este respecto ha publicado dos libros específicos sobre esta temática y mantiene viva la gestión integral del agua en la edificación como línea de producto activa y en permanente evolución, e.g. La gestión integral del agua de lluvia en entornos edificados: https://bit.ly/2ynLt8Q

Es precisamente en este contexto de medidas innovadoras y soluciones tecnológicas donde el concepto "cambio climático" ha adquirido un sentido contrario al pernicioso que suele acompañarle, y es que ha unido a técnicos y científicos con un objetivo común: diseñar e implementar medidas preventivas y mitigadoras del mismo y aunar esfuerzos ante esta amenaza común. El grado de conocimiento alcanzado no servirá de nada si no se ponen en marcha medidas efectivas y reales, en general estructurales, llevadas a cabo por empresas especializadas, sea cual sea la fuente de financiación.

Entre todas las técnicas de gestión hídrica, la recarga gestionada se considera uno de los métodos más eficientes para luchar frontalmente contra los efectos adversos del cambio climático.

Figura 9. Como reacción al calentamiento global, el almacenamiento del agua como recurso estratégico se encuentra en tendencia alcista en varios países.

5. La recarga gestionada de los acuíferos en una aproximación descendente

Las características específicas del arco mediterráneo y su distribución irregular del agua en el espacio y en el tiempo, requieren aportar procedimientos específicos diseñados *ad hoc* para el uso eficiente de los recursos hídricos.

Por otro lado, la técnica de gestión hídrica de la recarga gestionada tiene un grado de implantación muy diferente en los distintos continentes y países. Mientras que en Estados Unidos, Australia, India o Países Bajos es una tecnología de primer orden que goza de una buena acogida por parte de la población, en otros lugares su aceptación es menor. Su carácter integrador y su escaso coste frente al de las grandes obras hidráulicas conllevan una creciente atención por parte de países en vías de desarrollo.

A día de hoy gran cantidad de países han incorporado esta técnica en sus nuevos o futuros planes hidrológicos, propiciando oportunidades para las empresas especializadas en forma de licitaciones, encargos y mecanismos de cooperación internacional.

Algunos de los países emergentes con decididas apuestas por esta tecnología son Brasil, Chile, México, Perú, Nicaragua, Costa Rica, etc. Incluso en Afganistán, donde se ha aprobado recientemente un proyecto para complementar el abastecimiento de Kabul mediante aguas almacenadas intencionadamente en los acuíferos (KMARP). Todos ellos consideran esta alternativa sólida y viable, por lo que han iniciado acciones para su desarrollo e implementación.

Contexto internacional

En el marco del primer proyecto sobre MAR promovido por el Grupo (RECACUIF) se llevó a cabo un inventario a nivel mundial, constatando la amplia diversidad y el distinto grado de desarrollo y confianza en esta técnica. Empezando por el continente americano, ya se podía apreciar el alto grado de implantación y tecnificación en los Estados Unidos, con incluso legislaciones específicas para los estados de Florida y California, y un desarrollo vertiginoso en otros como Arizona y Oregón, en general para el riego de campos de golf y para reservas estratégicas, respectivamente.

En el resto de los países americanos se detectó una puesta en marcha bastante incipiente, con experiencias en alza en el norte de México, abundancia de dispositivos en general de bajo coste en Brasil, un interés creciente en Chile y una tradición de varios siglos en Perú, Bolivia, Ecuador y Colombia, donde, gracias a las amunas incas, pueden ser considerados los pioneros de la técnica en este continente. El panorama indica un "mercado" en auge y creciente.

En Asia la actividad es muy alta, con abundancia de dispositivos de bajo coste y un gran desarrollo de técnicas de cultivo de agua en la India, incluso en ámbito urbano, con una tecnología autodidacta y creciente en materia de recarga en áreas urbanas. En China y Corea del Sur también hay varios dispositivos inventariados, gran parte de ellos relacionados con diques enterrados para represar el agua subterránea.

En Oceanía hay un amplio desarrollo de dispositivos de gran envergadura, en general conectados a plantas de tratamiento de aguas residuales en las mayores ciudades. En Australia los avances técnicos y científicos son ímprobos, ante la amenaza permanente de la desertificación y la escasez de agua.

En África ha habido experiencias interesantes y una gran actividad en la República Surafricana y Namibia, habitualmente con participación estatal. Otras iniciativas han sido registradas en Kenia y un creciente grado de implantación en los países mediterráneos del este y norte de África (MENA), siendo quizás Túnez y Jordania los que mayor actividad muestran, sin menoscabo de las restantes actuaciones en El Líbano, Egipto, Argelia, Marruecos, etc.

En Europa hay una gran dispersión de dispositivos en la mayor parte de los países, con especial concentración en la Países Bajos y Alemania. En estos han puesto a punto sistemas de RBF o *River Bank Filtration,* en los que aprovechan la margen del río para depurar sus aguas de manera natural. Posteriormente éstas son utilizadas para recargar acuíferos o incluso para consumo directo. Hay además importantes ejemplos de infiltración interdunar.

El proyecto de I + D Demeau, FP7 (https://www.demeau-fp7.eu/), publicó un inventario muy avanzado con un amplio tratamiento estadístico, diferenciando diez esquemas en base al sistema de funcionamiento.

De entre todos los países estudiados, es España el que presenta mayor diversidad, con presencia de ocho de estas diez tipologías. De este modo, aunque en España la técnica MAR no haya alcanzado aún el grado de desarrollo deseable, por haber una mayor confianza tradicional en las técnicas de almacenamiento de agua en superficie, el panorama es esperanzador. Además hay grandes previsiones de inversión en varios Planes hidrológicos de cuenca de la 2ª y de la 3ª etapas de planificación, en aras de incorporar nuevas celdas de almacenamiento en los esquemas de gestión (ver capítulo 8).

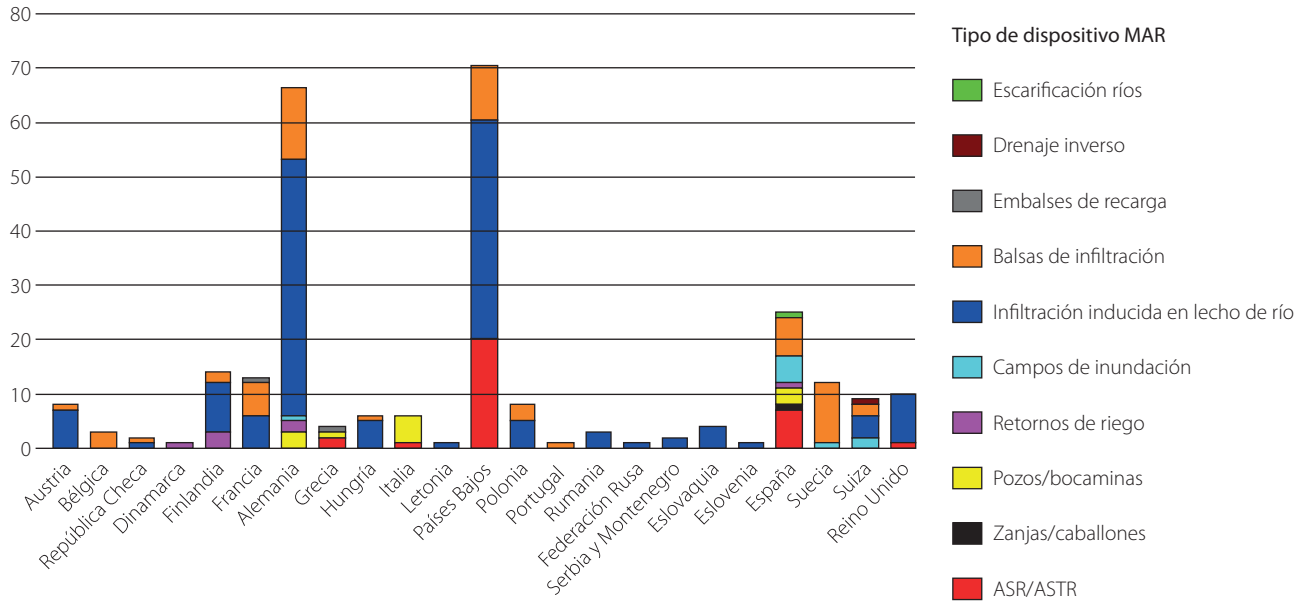


Figura 10. Histograma del proyecto europeo DEMEAU con inventario de dispositivos de recarga gestionada en varios países europeos clasificados por su tipología. Modificado de https://www.demeau-fp7.eu/

No todos los reservorios tienen programados un uso inmediato, al estar previsto contar con reservas de aguas subterráneas como recurso estratégico en varios países. Estos embalses subterráneos de agua dulce, en permanente desarrollo, tienen pretensiones de ser empleados para contrarrestar los efectos adversos del cambio climático, en especial la escasez de agua y la sequía cuando resulten necesarios.

Desde 2015 la institución de los Países Bajos IGRAC (International Groundwater Resources Assessment Center) y la Universidad Politécnica de Dresden llevan a cabo un inventario actualizado, ayudados por diversas empresas, universidades y centros de investigación. Para ello hay habilitado un canal para recabar información de todo el mundo.

Aunque en España la técnica MAR no haya alcanzado aún el grado de desarrollo deseable, hay grandes previsiones de inversión en varios Planes hidrológicos de cuenca de 2ª y 3ª etapas de planificación

El sistema se llama MAR-Portal y cuenta ya con aproximadamente 1.200 plantas de recarga diseminadas por los cinco continentes. El sistema es accesible desde el enlace: https://ggis.un-igrac.org/ggis-viewer/viewer/global-mar/public/default

Desde el Grupo se ha aportado el catálogo de España.

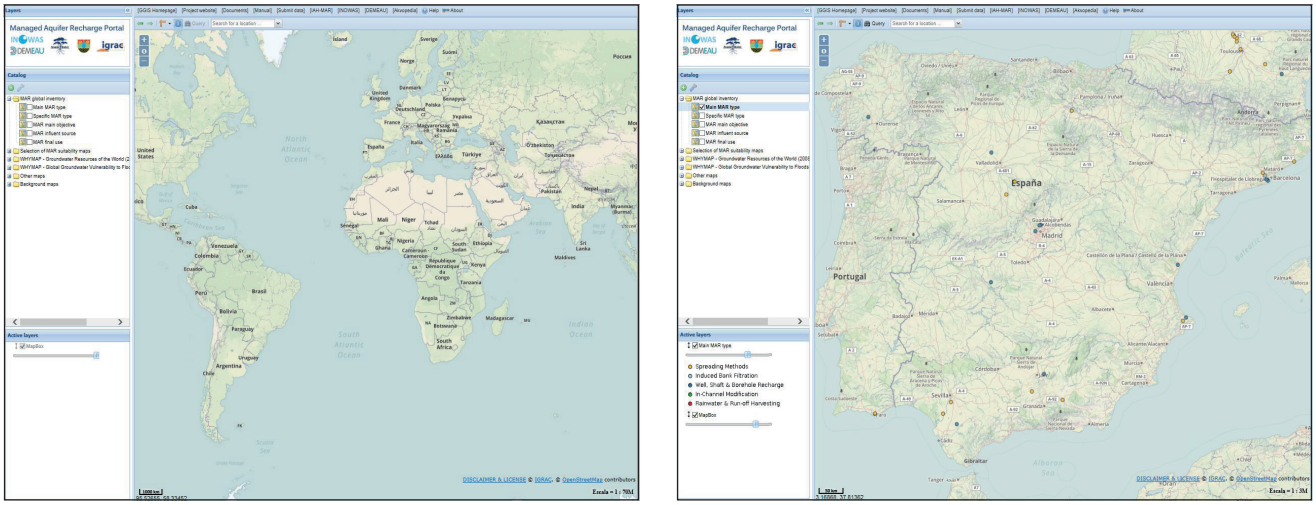


Figura 11. Portal Web de IGRAC con el inventario de dispositivos de recarga gestionada a nivel internacional y nacional.

Contexto nacional

El volumen máximo de agua que podría ser recargada en España es muy alto en comparación a otros países, gracias a las grandes cuencas sedimentarias que constituyen excelentes acuíferos. La figura siguiente muestra la ubicación y la tipología de los 33 dispositivos de recarga gestionada, bien fueran experimentales o permanentes, que se han llevado a cabo en España (conforme al inventario realizado por el Grupo en 2009, publicado en DINA-MAR, 2010).

Conforme a los estudios y resultados de DINA-MAR, 2010, un 17 % del territorio español peninsular (casi 67.000 km^2) son susceptibles a la aplicación de la técnica MAR, según se ha deducido mediante GIS avanzado y operaciones de álgebra de mapas durante un estudio de I+D+i que tuvo dos años de duración. Estos resultados pueden ser consultados en el visor cartográfico explicado con detalle en la referencia del Grupo www.mdpi.com/2073-4441/6/7/2021/pdf (en inglés) y en el Boletín Geológico y Minero http://www.igme.es/boletin/2014/125_3/9_%20Articulo%206.pdf (en español). Todo un ejemplo de Sistema de Soporte a la toma de Decisiones (DSS) y, en ciertos casos, de Colaboración Público-Privada (PPP).

Según la referencia mencionada, la cuenca hidrográfica más proclive a desarrollar esta tecnología es la del Duero, seguida de Baleares y Tajo. Esto se debe, en general, a la cantidad y calidad de las fuentes de toma, ya que varios de sus cauces fluviales permiten la detracción de un cierto volumen de su caudal fluyente en época de lluvias para su almacenamiento subterráneo. Estos esquemas son de carácter temporal, estacional o intermitente, al depender de los ríos.

La única opción de recarga permanente (24/7) es con aguas depuradas procedentes de plantas de tratamiento que alcanzan la calidad requerida (tratamiento terciario o secundario avanzado con post-tratamiento).

Las expectativas de creación de nuevas infraestructuras y prototipos para recargar acuíferos están contempladas en varios planes hidrológicos de cuenca. Por ejemplo, la última versión del Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro anuncia la implementación de un total de 25 dispositivos complementarios al esquema actual de gestión.

Otros planes hidrológicos de cuenca tienen muy presente la reutilización y la "técnica MAR", tales como el Plan Hidrológico de las Islas Baleares (PHIB), que menciona la conveniencia de este tipo de dispositivos, así como el del Guadalquivir, Duero, etc. (ver capítulo 8). De hecho, el Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero (segunda etapa de Planificación) es, de nuevo, altamente receptivo a la implementación de sistemas MAR.

Experiencia del Grupo Tragsa

En los 40 años de historia del Grupo Tragsa se han realizado numerosos anteproyectos, proyectos, ejecución de obras, mantenimiento, monitoreo, acciones de sensibilización, difusión, transferencia tecnológica, organización de congresos, cartografías, publicaciones, etc.

En la figura siguiente se ha incorporado el logotipo del Grupo en todos aquellos en los que ha habido algún tipo de intervención. El logotipo adicional es el del Instituto Geológico y Minero de España, institución que ha desarrollado varios dispositivos, en general en Andalucía y la isla de Mallorca, con carácter experimental.

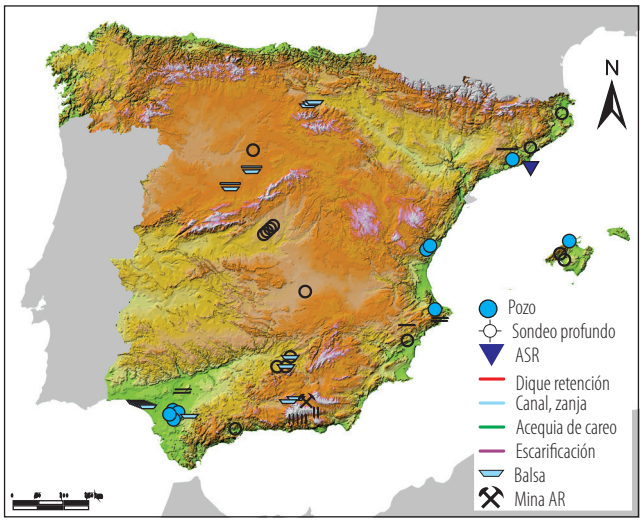


Figura 12. Inventario de dispositivos de recarga gestionada a nivel nacional (DINA-MAR, 2010).

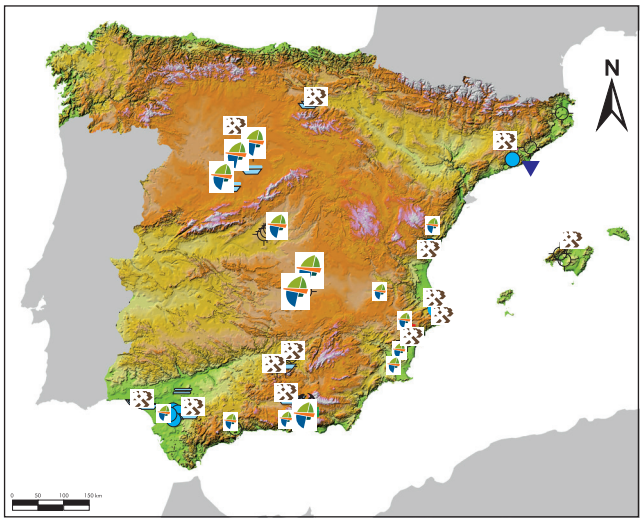


Figura 13. Inventario de experiencias y dispositivos de recarga gestionada en España (operativos o en desuso) de DINA-MAR (2010) y logotipo en aquellos en los que han intervenido Tragsa y el Instituto Geológico y Minero de España (MARSOL, 2015). El tamaño del logotipo es proporcional al del dispositivo.

El Grupo Tragsa, ante el interés creciente de la técnica MAR, que va adelantando posiciones frente a otras técnicas con las que se integra (gestión de cuencas, reutilización, desalación, aprovechamiento de excedentes, reducción de fugas, etc.) quiere mantener su posición estratégica adquirida en estos últimos años, con la participación en proyectos de I+D+i y en consorcios europeos y ejecutando acciones pragmáticas, en aras de incrementar su capacidad técnica y, si fuere posible, su volumen de negocio.

En este sentido, por ejemplo, Tragsatec ha llevado a cabo un estudio de detalle sobre los sectores más idóneos para implementar nuevas actuaciones de recarga gestionada distribuidos por toda la cuenca del Duero: http://www.dina-mar.es/post/2010/04/29/documentacion-tecnicanoticias.aspx

El Grupo ha creado y puesto a disposición de los gestores de las Administraciones un sistema para la toma de decisiones o DSS apoyado en una aplicación GIS que permite comprobar, en una primera aproximación, la idoneidad de implementar dispositivos de recarga en cada zona del país. El método se basa en el cruce de unas 30 coberturas temáticas (correctamente unificadas en bordes y proyección a pesar de proceder de varios orígenes).

Mediante esta herramienta de consulta se puede conocer el tipo de acuífero objetivo donde planificar una actividad, su comportamiento hidráulico, el tipo de dispositivo más idóneo, e incluso una aproximación a los costes dependiendo de la complejidad del sistema a implementar.

Esta herramienta, que fue denominada "hidrogeoportal", ha sido presentada como una herramienta de tanteo y primera aproximación dentro del sistema de toma de decisiones. Evidentemente, cualquier implementación posterior requerirá su estudio de detalle correspondiente.

Acceso a la aplicación hidrogeoportal DINA-MAR: http://sig3.tragsatec.es/visor_dina-mar/ (actualmente en proceso de actualización).

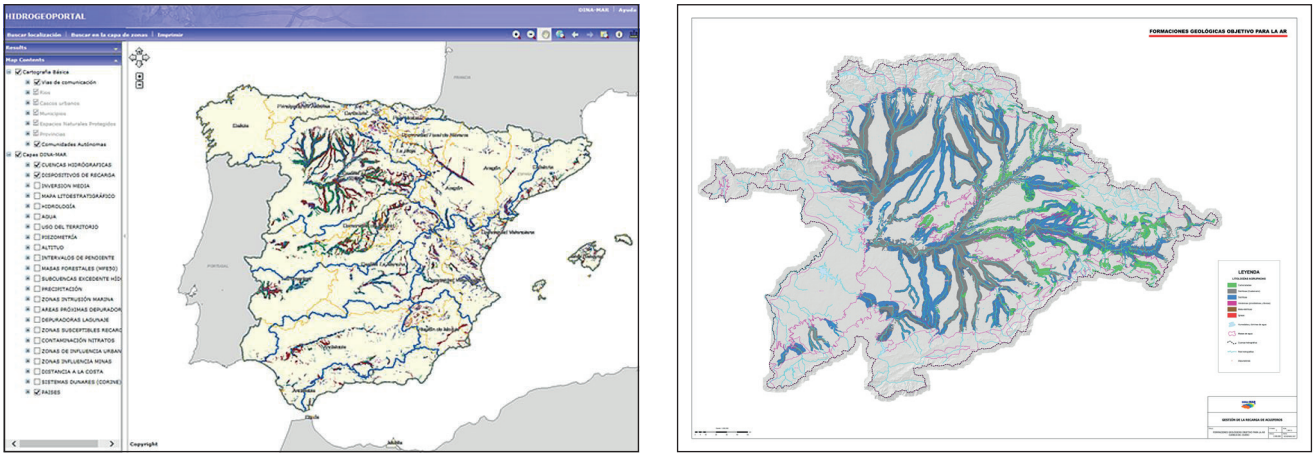


Figura 14. Ejemplo del Hidrogeoportal DINA-MAR, para una primera aproximación a la determinación de las zonas de España más idóneas para aplicar la técnica de la recarga gestionada de los acuíferos.

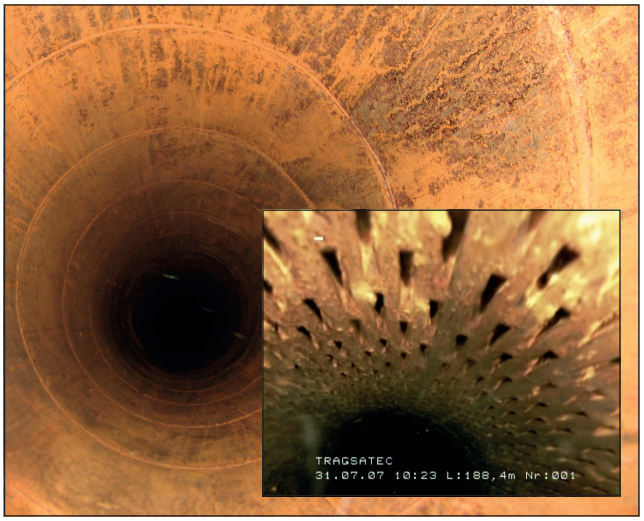


Figura 15. Registros Ópticos de Televisión y Vídeo (ROTV) en dos sondeos de recarga gestionada.

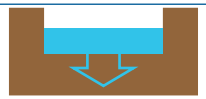
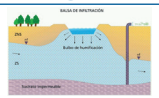
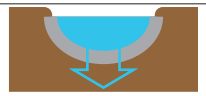
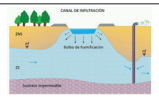
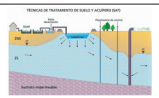
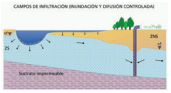
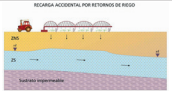
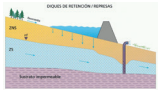
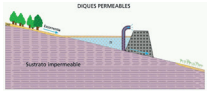
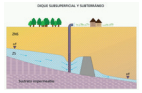
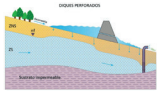
En los 40 años de historia del Grupo Tragsa se han realizado numerosos anteproyectos, proyectos, ejecución de obras, mantenimiento, monitoreo, acciones de sensibilización, difusión, transferencia tecnológica, organización de congresos, cartografías, publicaciones, etc.

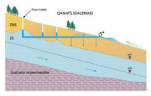
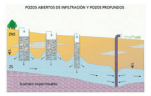
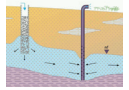
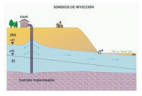
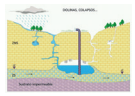
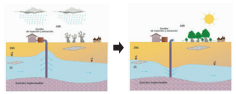
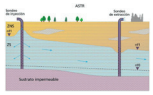
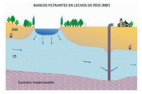
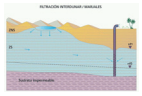
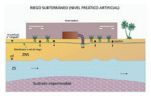
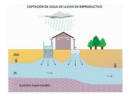
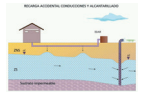
6. Dispositivos de recarga y soluciones tecnológicas MARSOL

Dispositivos de recarga

Desde el primer proyecto de I+D+i financiado por el Grupo se ha trabajado intensamente en la elaboración del inventario de dispositivos empleados a nivel internacional para infiltrar agua en los acuíferos. Se han inventariado las 24 tipologías distintas siguientes:

Figura 16. Inventario internacional de dispositivos de recarga por su tipología (DINA-MAR, 2010).

Sistema	Tipo de dispositivo	Icono	Figura	Foto	Leyenda
DISPERSIÓN	Balsas de infiltración / humedales				Humedal artificial para la recarga del Sanchón, Coca, Segovia. Foto: DINA-MAR.
	Canales y zanjas de infiltración				Canal de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste, Segovia, Spain, operativa desde 2002. Foto: DINA-MAR.
	Caballones/técnicas de tratamiento suelo/ acuífero				Caballones en el fondo de una balsa de infiltración. California. Foto: D. Peyton.
	Campos de infiltración (inundación y difusión controlada)				Campo de infiltración de Omdel (Namibia). Foto: G. Tredoux.
	Recarga accidental por retornos de riego				Recarga artificial por retornos de riego. Extremadura, España.
CANALES	Diques de retención y represas				Dique de recarga artificial en cabecera de cuenca, Alicante.
	Diques permeables				Dique permeable en Huesca. Foto: Tragsatec.
	Serpenteos / levees				Serpenteos en Sacramento, California. Foto: A. Hutchinson.
	Escarificación lecho				Escarificación del lecho del río Besós, Barcelona. Foto: J. Armenter.
	Diques subsuperficiales/subterráneos				Dique subsuperficial (embalse de arena) en Kytui, Kenia. Foto: Sander de Haas.
	Diques perforados				Dique perforado. Lanjarón, Granada, España. Foto: Tragsatec.

POZOS	Qanats (galerías subterráneas)				Qanat de Carbonero el Mayor, Segovia. Foto: E.F. Escalante.
	Pozos abiertos de infiltración				Pozo abierto de infiltración. Arizona, EE UU. Foto: DINA-MAR.
	Pozos profundos y minisondeos				Pozo de recarga artificial. Cornellá, Barcelona. Foto: DINA-MAR.
	Sondeos				Sondeo para MAR (ASR) en Adelaida. Foto: P. Dillon.
	Dolinas, colapsos…				Colapso cárstico "El Hundimiento". Alicante, España. Foto: DINA-MAR.
	ASR				Dispositivo ASR en Scottsdale, Arizona. Foto: DINA-MAR.
	ASTR				Dispositivo ASTR en California.
FILTRACIÓN	Bancos filtrantes en lechos de ríos (RBF)				Sistema RBF para MAR en Eritrea. Foto: A. Twinhof.
	Filtración interdunar				Filtración interdunar cerca de Amsterdam, Holanda. Foto: Allus.
	Riego subterráneo				Riego subterráneo en Andalucía. Foto: Tragsa.
LLUVIA	Captación de agua de lluvia en improductivo				Captación de lluvia en improductivo para MAR.
SUDS	Recarga accidental conducciones y alcantarillado				Recarga artificial desde el alcantarillado en España. Foto: Tragsa
SUDS	Sistemas urbanos de drenaje sostenible				SUDS. Gomeznarro. Madrid.

Calidad del agua a recargar

A nivel nacional no existe una reglamentación para la calidad del agua de recarga, excepto para el caso en el que esta proceda de plantas de tratamiento de aguas residuales (aguas depuradas o regeneradas).

El RD 1620/2007 establece valores máximos admisibles según el uso del agua previsto. Los parámetros exigidos son escasos pero altamente restrictivos, siendo una de las legislaciones más exigentes del mundo.

En el contexto internacional, se ha recopilado y comparado la legislación específica de 12 estados que han regulado los estándares de calidad (MARSOL, 2017).

El resto de los países sin legislación específica se rigen por la norma de la Organización Mundial de la Salud (OMS = WHO); y en cualquier actuación en el extranjero, cada promotor se debe asegurar de que los efluentes de las depuradoras cumplen los requisitos de calidad de la OMS 2003.

Tabla 1. Valor máximo admisible (VMA) de los parámetros regulados en la legislación vigente para la recarga del acuífero por percolación y por inyección.

Uso del agua previsto	Valor Máximo Admisible (VMA)				
	Nematodos intestinales	*Escherichia coli*	Sólidos en suspensión	Turbidez	Otros criterios
5. USOS AMBIENTALES					
CALIDAD 5.1 a) Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno.	No se fija límite	1.000 UFC/100 mL	35 mg/L	No se fija límite	NT[1]: 10 mg N/L NO_3 : 25 mg NO_3/L Art. 257 a 259 del RD 849/1986
CALIDAD 5.2 a) Recarga de acuíferos por inyección directa.	1 huevo/10 L	0 UFC/100 mL	10 mg/L	2 UNT	
CALIDAD 5.3 a) Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público. b) Silvicultura.	No se fija límite	No se fija límite	35 mg/L	No se fija límite	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.
CALIDAD 5.4 a) Otros usos ambientales (mantenimiento de humedales, caudales mínimos y similares).	La calidad mínima requerida se estudiará caso por caso				

[1] Nitrógeno total.

Tabla 2. Propuesta de los requerimientos del agua regenerada para la recarga "artificial" (OMS, 2003).

	Tipo de recarga	
Tipo de contaminante	Infiltración superficial	Inyección subsuperficial
Microorganismos patógenos Tratamiento secundario	≤ 30	
Filtración	≤ 2 NTU	
Desinfección	Inactivación de virus 4-log ≤ 2 % coliformes totales	
Tiempo de retención en el subsuelo	6 meses	12 meses
Separación horizontal	153 m	610 m
Contaminantes regulados	Los de la Ley de potables	
Contaminantes no regulados		
Tratamiento secundario	DBO < 30 mg/L; COT < 16 mg/L	
Ósmosis inversa	Considera 4 opciones Profundidad hasta el agua subterránea a tasas de percolación: < 0,2 pulgadas/min a 10 pies < 0,3 pulgadas/min a 20 pies	
Extensión superficial con extracción del 50 % del TOC		
Opción de monitoreo del límite superior	Demostrar viabilidad en límite superior	
Porcentaje de agua regenerada	≤ 50 %	

DBO: demanda bioquímica de oxígeno. NTU: unidades nefelométricas de turbidez. COT: carbono orgánico total. RWC: porcentaje de agua regenerada en los pozos de extracción.

Actualmente está previsto que la OMS actualice esta tabla. Según consta en su página web (http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/es/), entre sus documentos en preparación se incluye uno que tiene por título "Aspectos de salud derivados de la recarga de acuíferos con agua regenerada".

Otros estándares de calidad para las aguas de recarga gestionada se han recopilado en la tabla 3, donde aparecen los valores recomendados en distintos países y sus autores.

Parece evidente que el valor máximo admisible o VMA para cada parámetro y las formas de recarga deberán quedar explícitamente incluidos en la legislación futura de cada país.

Figura 17. Recarga a un acuífero kárstico mediante una dolina en Alicante (a) y mediante un pozo-sondeo junto al canal del Guadiana (Ciudad Real) (b).

El RD 1620/2007 establece valores máximos admisibles según el uso del agua previsto. El resto de los países se rigen por la norma de la OMS

Tabla 3. Estándares de calidad establecidos por distintos autores para los principales parámetros del agua de recarga.

Concepto	Tipo de sistema	Valor umbral	Comentarios
COLMATACIÓN FÍSICA	Sistema profundo	[9] [TSS] < 2 mg/L [1,9] [TSS] < 0,1 mg/L [2] MFI < 3-5 s/l2 [1,3] Turbidez < 1 NTU [11] [TSS] < 3-4 mg/L	Si K > 40 m/día Si 4 m/día < K < 40 m/día
	Sistema superficial	[1, 3, 9, 12, 13] [TSS] < 10 mg/L Turbidez < 5 NTU	
COLMATACIÓN BIOLÓGICA	Sistema profundo	[4] pH > 7,2 (Bacteria de hierro) [4, 11, 12, 13] Evitar CO2	
		[4,13] COD < 2 mg/L [4] Eh > 10 mV	Según normas suizas
	Sistema superficial	TOC < 10 mg/L	
COLMATACIÓN QUÍMICA		[6] [Fe2+]GW < 0,2 mg/L [8] Índice Ryznar > 7 [8, 11, 13] pH < 7,5 [8] Bajo [Ca2+] y [Mg2+] [8] TSD < 150 mg/L [8] [Cl] < 500 mg/L [11] [Fe total] 0,02-0,1.	Más importante para la extracción que para la recarga de pozos. Los índices de saturación de minerales son esenciales.
CORROSIÓN		[8] OD < 2 mg/L [8] Índice Ryznar < 9 [8] pH > 7 [8] CO2 < 0,50 mg/L [8] [TSS] < 1,000 mg/L [8] Evitar H2S	Aplicable a pozos y tuberías.

K: permeabilidad. TSS: total de sólidos en suspensión. MFI: índice de fallo en membrana. NTU: unidades nefelométricas de turbidez. COD: carbono orgánico disuelto. TSD: total de sólidos disueltos. OD: oxígeno disuelto.

[1] Normas Holandesas (Peters, pers. comm.); [2] Olsthoorn (1995); [3] Normas Alemanas (Schottler, pers. comm.); [4] Degalier (1987); [5] van der Kooij & Hijnen (1990); [6] Lucas *et al,* (1995); [7] Hills *et al,* (1989); [8] Ford (1990); [9] Pyne (1995); [10] Hurni; [11] Rinck Pfeiffer (2002); [12] Normas NWQG de Australia (Nacional Water Quality Guidelines), CSIRO, Moran *et al,* 2001; [13] Standard Guidelines for artificial recharge (EWRI-ASCE, 2001). Modificado de Fernández, 2005.

Soluciones tecnológicas

Como soluciones tecnológicas se entienden aquellos criterios de obra y parámetros de gestión que permiten aumentar y mejorar la efectividad de los dispositivos de recarga gestionada. En la actualidad el Grupo Tragsa cuenta con experiencia en cerca de 73 soluciones tecnológicas que han sido recopiladas en la publicación "13-1: MAR Technical Solutions" en: http://www.marsol.eu/35-0-Results.html

La base de datos sobre las soluciones técnicas se ha adaptado para incluir toda la información pertinente de los lugares MARSOL conforme a cinco categorías:

1. Soluciones técnicas relativas al agua de recarga. Aspectos cuantitativos.
2. Soluciones técnicas relativas al agua de recarga. Aspectos cualitativos.
3. Soluciones técnicas relativas a las actuaciones en el medio receptor (tanto en suelo como acuífero).
4. Soluciones técnicas relativas a los parámetros de gestión, buenas prácticas y criterios de utilización.
5. Soluciones técnicas como resultado de la combinación de las previas (sistema integrado).

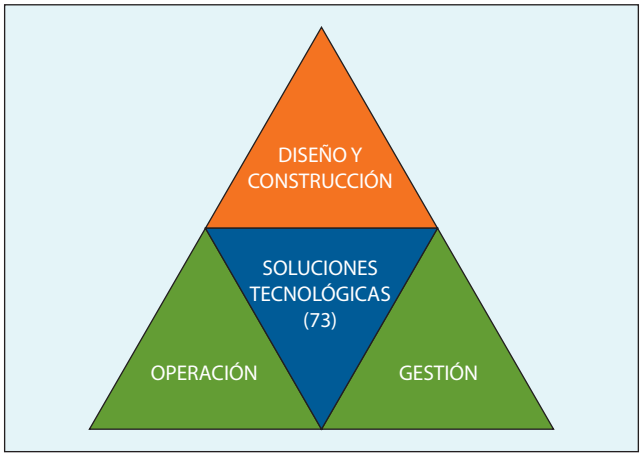


Figura 18. Grandes grupos en que han sido clasificadas las soluciones tecnológicas agrupadas durante el transcurso del proyecto MARSOL.

Estas categorías engloban cuatro subgrupos para agrupar las 73 soluciones tecnológicas (S.T.) por criterios de homogeneidad.

1.1. Aspectos cuantitativos del agua (S.T. 1 a 5).
2.1. Pre-tratamiento del agua de recarga (S.T. 6 a 12).
2.2. Dispositivos superficiales (S.T. 13 a 16).
2.3. Inyección profunda (S.T. 17 a 19).
2.4. Medio receptor (S.T. 20 a 24).
2.5. Otros (S.T. 25).
3.1. Estudios previos (S.T. 26 a 27).
3.2. Dispositivos superficiales (S.T. 28 a 35).
3.3. Dispositivos de inyección y piezómetros (S.T. 36 a 41).
3.4. Aspectos operativos (S.T. 42 a 46).
4.1. Operación (S.T. 47 a 53).
4.2. Mantenimiento (S. T. 54 a 56).
4.3. Sistemas de ayuda a la toma de decisiones (S.T. 57 a 63).
4.4. Gestión (S.T. 64 a 70).
4.5. Reutilización de estructuras preexistentes (S.T. 71 a 73).

Dada la longitud y complejidad del tema, se remite al lector interesado al entregable 13-3 del proyecto MARSOL, escrito por Tragsa y disponible en http://www.marsol.eu/35-0-Results.html y en el libro *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica,* publicación accesible para descarga libre en el enlace https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/manejo-recarga-acuiferos-ehl.pdf. De todas las soluciones propuestas, se han extraído algunas de especial relevancia que cuentan con desarrollos específicos.

A partir de este amplio grupo de recomendaciones o soluciones tecnológicas, se han extraído las más aplicables para cada zona de actuación del Grupo, trasmitiendo a los usuarios finales el conocimiento necesario para que sean ellos mismos los que lleven a cabo acciones de gestión y mantenimiento. Como ejemplo se han elaborado tres posters divulgativos que han sido emplazados en zonas muy visibles de los sectores activos. Un ejemplo de los mismos se presenta a continuación.

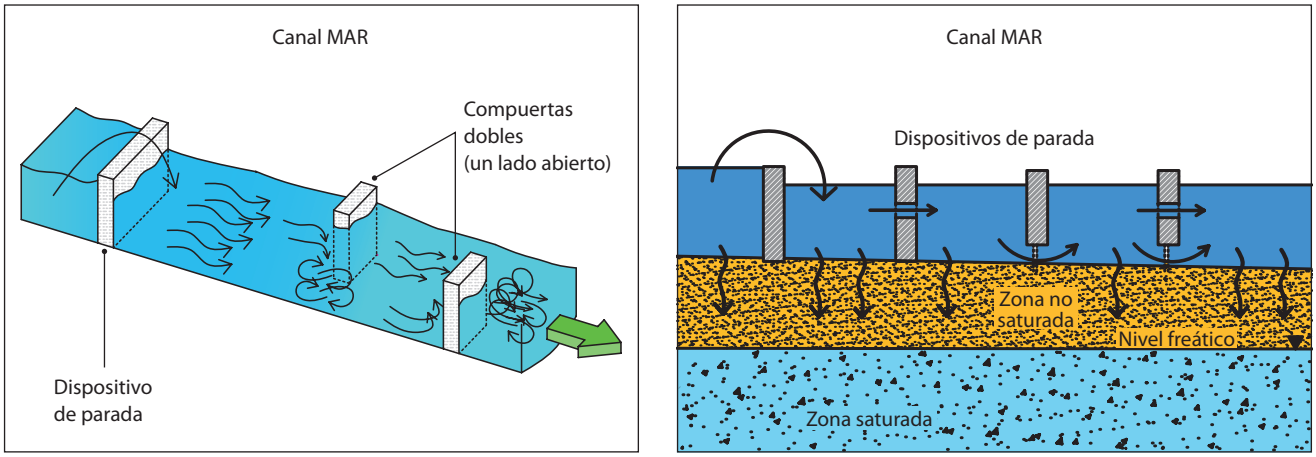
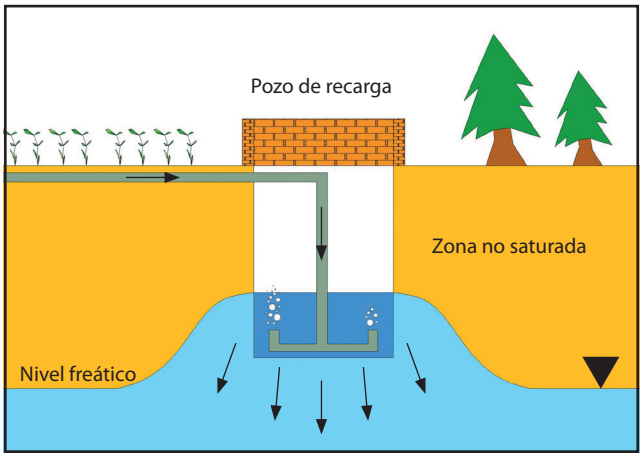


Figura 19. Sistema para homogenizar el agua de recarga mediante dispositivos de parada alternos, evitando su estratificación térmica e hidroquímica.



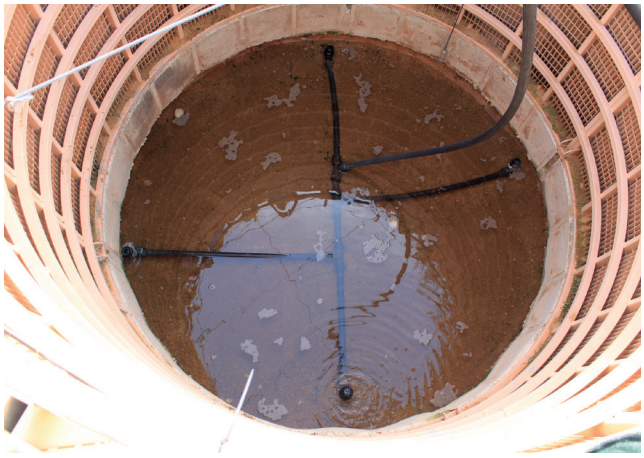


Figura 20. Sistema para la infiltración de agua a través de un pozo de gran diámetro minimizando el oxígeno disuelto en la misma mediante tuberías de PVC que evitan su aireación. El agua es conducida hasta una cota por debajo del nivel freático.

Figura 21. Sistema para la decantación de la arena en suspensión del agua de recarga combinado con la presa de derivación específicamente diseñada para este fin y construida en el río Cega. El Carracillo (Segovia).

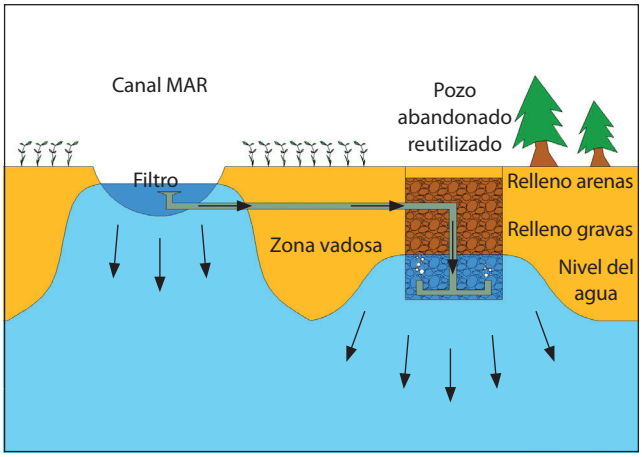


Figura 22. Esquema del sistema de derivación del agua de un canal de recarga gestionada hacia un pozo abandonado debidamente acondicionado, siguiendo nuestra premisa *No cierres un pozo, reutilízalo.*

Figura 23. Póster de metal divulgativo instalado en la comarca de El Carracillo para informar a los usuarios finales de soluciones tecnológicas aplicables en sus instalaciones.

7. Beneficiarios: ¿cuánta gente puede beneficiarse y participar de la recarga?

Los destinatarios finales de esta actividad, en primer lugar, serán los promotores e implementadores, bien sea por iniciativa privada o dentro de esquemas de financiación pública, así como los usuarios finales.

Como agentes más relacionados cabe destacar las comunidades de regantes para su principal uso, el agrícola, municipios (quienes deben garantizar el abastecimiento de agua a su población en su territorio, conforme a la ley), plantas de tratamiento de aguas residuales, usuarios finales (toda la población), industria, administración pública… Estas acciones quedan supeditadas al coste de las obras, su duración, mantenimiento y el tipo de cliente.

Uso industrial. Principales sectores demandantes

El Grupo de Trabajo internacional en el marco de la Asociación Internacional de hidrogeólogos *MAR to MAR-k€t,* que lidera Tragsa, https://recharge.iah.org/mar-to-market, ha identificado varios grupos de agentes relacionados, hacia los que dirige acciones de difusión y transferencia tecnológica debidamente adaptadas. Estos son:

1. **Agro-industria.** Principal usuario de las aguas procedentes de la recarga gestionada.
2. **Depuración de aguas residuales.** La inyección de aguas regeneradas a los acuíferos está regulada en España (RD 1620/2007) mientras que a nivel europeo hay constituido un Grupo de Trabajo con previsiones de elaborar la nueva Directiva para 2020.
3. **Desalación.** Al ser agua de alto coste, solo los excedentes se utilizan para la recarga.
4. **Embotelladoras de agua y bebidas.** Al igual que en el caso previo, solo se recargan excedentes hídricos. En muchas ocasiones se embotellan aguas fósiles de acuíferos profundos, pero la recarga se realiza en acuíferos superficiales, cuyas aguas indígenas son de distinta calidad. De ahí la necesidad de acometer estudios de viabilidad y evaluaciones de impacto con modelación directa.
5. **Campos de golf.** En España es habitual que sean regados con aguas regeneradas, aplicando la dosis precisa para no encarecer costes. En varios lugares del mundo se riegan mediante aguas recargadas previamente (Phoenix, Tucson…) lo que es una industria muy importante desde el punto de vista económico. En España ya es común en numerosas CCAA (Murcia, Madrid, Canarias…). Es previsible el incremento del riego de campos de golf en Europa una vez sea publicada la Directiva de reutilización final.
6. **Sectores de la Administración Pública.** Actualmente, en España hay más iniciativas para recargar agua en los acuíferos promovidas desde el sector público que desde el privado. La mayor parte están relacionadas con el regadío y las funciones medioambientales. Un buen ejemplo de esto último es la barrera hidráulica positiva para frenar la intrusión marina en la Zona Franca de Barcelona, experiencia paralizada en la actualidad por los altos costes energéticos.
7. **Balnearios.** Al igual que sucede para las embotelladoras, se trata de aguas de mineralización especial que, o bien son inyectadas en su acuífero de procedencia, o bien requieren un tratamiento previo a su infiltración o inyección.
8. **Hoteles e instalaciones turísticas *(Market Uptake).*** Algunos complejos hoteleros cuentan con reservas de agua para garantizar su suministro en caso de restricciones.

Figura 24. Utilización de las aguas de un manantial tipo *trop-plain* para la recarga gestionada de un acuífero.

Mejoras medioambientales

Las actuaciones de recarga gestionada de los acuíferos en España deben contar, conforme a la legislación vigente, con su correspondiente estudio de evaluación de impacto ambiental. La metodología más habitual consiste en disociar las afectaciones potenciales por factores del medio. Los más importantes son:

- Atmósfera.
- Aguas subterráneas (cantidad y calidad).
- Aguas superficiales (arroyos y humedales).
- Suelo (colmatación y biodepuración).
- Vegetación (corredores).
- Fauna (hábitats).
- Procesos ecológicos.
- Paisaje.
- Patrimonio.
- Socioeconomía (desarrollo rural).

De todos ellos, algunos requieren una atención especial. Como ejemplo se han estudiado y evaluado los principales factores con influencia en la recarga del sector de El Carracillo, en el acuífero de Los Arenales, provincias de Segovia y Valladolid. Los de mayor relevancia son:

- Impactos negativos sobre las aguas superficiales: derivación de caudales de ríos, con afecciones aguas abajo y modificaciones de su régimen hidrológico.

  Con signo contrario cabe destacar la mejora de la calidad de las aguas mediante su depuración natural en humedales artificiales y en los canales de conducción.
- Vegetación: evaluación del riesgo en las masas forestales, sin haberse percibido ningún impacto en los pinares. Con signo contrario puede haber impactos diferidos en la vegetación de ribera de los cauces fluviales de toma y la orla perimetral de los humedades.
- Fauna: la evaluación del impacto en la fauna resulta controvertido. Por un lado hay actuaciones de signo positivo, como consecuencia de las acciones de restauración y uso ambiental, en especial por la generación de corredores biológicos y refugios para la avifauna. Con signo contrario hay detractores que alertan de una disminución en la biodiversidad en el cauce donador. La intensidad del impacto debe ser evaluada en cada caso concreto.
- El impacto sobre la socioeconomía para este ejemplo concreto es claramente positivo. Los agricultores de El Carracillo han sabido gestionar adecuadamente la mayor disponibilidad de agua, aumentando el número de parcelas en regadío, la productividad, creación de empleo, fijación de la población rural, compensar la bajada de los precios de productos agrícolas mediante una mayor producción, etc. En sentido contrario ha habido alegaciones por parte de minicentrales hidroeléctricas, del río Cega aguas abajo del punto de derivación, así como de asociaciones contrarias a la derivación de caudales fluviales.

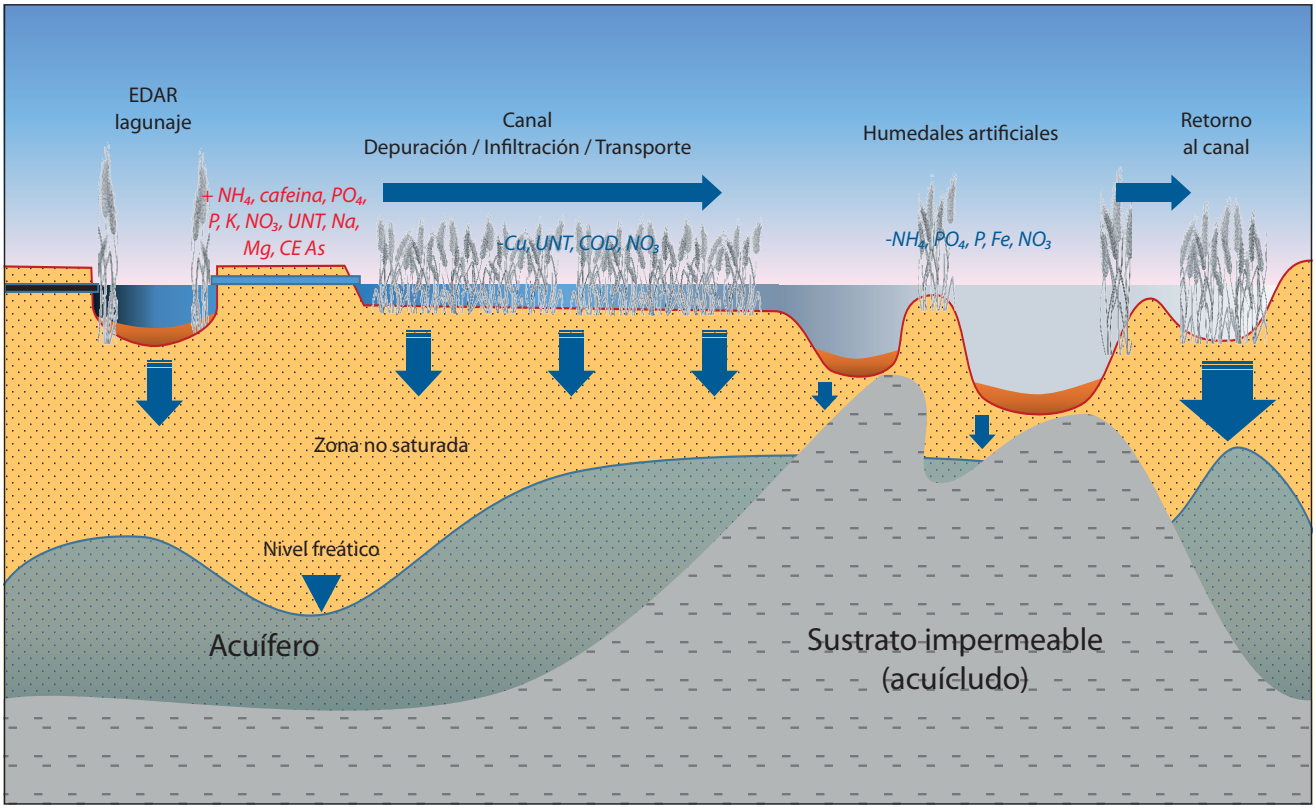


Figura 25. Procesos que intervienen en la mejora de la calidad del agua en los humedales artificiales y en los canales de conducción e infiltración (con fondo y paredes permeables).

Figura 26. Humedales artificiales en El Carracillo, Segovia.

Figura 27. Agroindustria en El Carracillo y Alcazarén, respectivamente.

8. Servicios que el Grupo Tragsa puede ofrecer

El Grupo Tragsa está capacitado técnicamente para abordar proyectos de recarga gestionada de acuíferos "llave en mano".

Dispone de un visor cartográfico que gestiona 30 variables para determinar las zonas más idóneas para recargar los acuíferos en España. Las variables más relevantes son la capacidad de almacenamiento, la permeabilidad del terreno y la disponibilidad de agua en ríos cercanos y depuradoras. Una vez delimitada la zona propicia, se selecciona y diseña el dispositivo de recarga más apropiado, en función de la hidrogeología, el origen del agua y las circunstancias medioambientales del área. Posteriormente se define el caudal de recarga máximo, el espesor de la lámina de agua más adecuado para una mayor infiltración y los parámetros de gestión. Tras haber definido el diseño, se calculan los costes de obra, mantenimiento y monitoreo.

Adicionalmente se ha adquirido una dilatada experiencia en la elaboración de estudios de impacto ambiental como promotores y en apoyo a los órganos sustantivos de la Administración, y en la revisión previa a las declaraciones de impacto, en apoyo a los órganos sustantivos y ambientales (cuya competencia es variable para cada comunidad autónoma, conforme a su legislación específica).

Como línea de investigación, el Grupo Tragsa ha participado y financiado dos proyectos nacionales la pasada década (RECACUIF, DINA-MAR) y tres proyectos internacionales en la actual (MARSOL, MARSolut y MtoM). La actividad más reciente ha estado centrada en el desarrollo de nuevos criterios de diseño y soluciones tecnológicas para incrementar la efectividad de las obras, con especial atención al ámbito mediterráneo, así como propuestas para la elaboración de la nueva legislación (Directiva de reutilización y recarga).

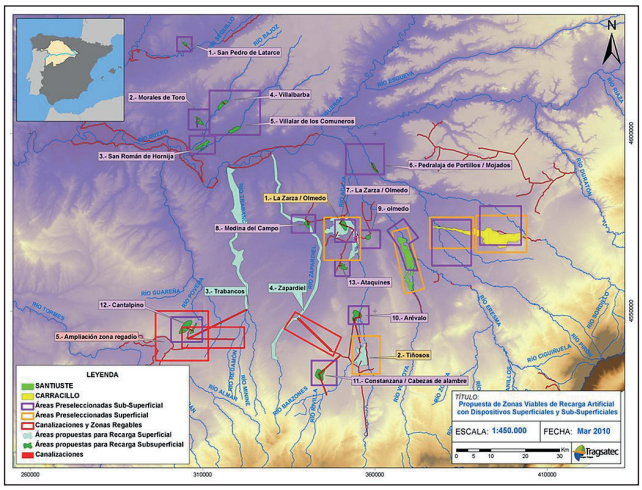


Figura 28. Identificación de zonas favorables para posibles recargas intencionadas en el ámbito de la comunidad autónoma de Castilla y León.

En el diseño de las infraestructuras se tienen en cuenta aspectos tanto técnicos como legales como condicionantes previos.

Cuando el origen del agua es una depuradora, se estudian e implementan los tratamientos necesarios para su infiltración con plenas garantías sanitarias.

Los principales productos novedosos del proyecto MARSOL, susceptibles de ofrecer a las Administraciones y AECID, son:

Localización de la formaciones geológicas más idóneas para la recarga

La metodología explicada en el apartado 5.3, desarrollada en el Grupo de forma exclusiva y pionera, es replicable (con ciertas adaptaciones) a cualquier lugar del mundo. Evidentemente es un instrumento de primera aproximación, que requiere el desarrollo posterior del proyecto correspondiente para cada obra civil.

(Ante)proyectos de dispositivos de recarga

Los (ante)proyectos realizados por el Grupo en el territorio nacional han sido varios, y en general de gran envergadura. Quizás los más destacables hayan sido los realizados en el acuífero Los Arenales con sistemas de recarga superficiales por infiltración, tipo canales, balsas y pozos de gran diámetro en un acuífero libre. Los trabajos fueron realizados para la Junta de Castilla y León y para la Confederación Hidrográfica del Duero.

Otra experiencia de gran tamaño ha sido la batería de sondeos para la recarga del acuífero Mancha Occidental con agua procedente del canal del Guadiana para la Confederación Hidrográfica del Guadiana. Este diseño fue realizado "a la carta", con un total de 25 elementos.

A estas actuaciones hay que añadir otras de menor consideración, tales como el zanjón para la recarga en Chulilla (Albacete), los sondeos para la regeneración hídrica en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel, el apoyo al Canal de Isabel II en la inspección televisada de sus sondeos perforados para recarga, etc.

Los proyectos de obra han estado precedidos de sendos estudios y anteproyectos. Un ejemplo importante de estudio de viabilidad ha sido la determinación de las principales zonas susceptibles de ser recargadas en el ámbito de Castilla y León para la Confederación Hidrográfica del Duero. Este estudio amplía hasta una escala de detalle las primeras determinaciones realizadas mediante visor cartográfico. Los principales resultados de este estudio se muestran de manera esquemática en la figura 28.

Obra de dispositivos de recarga

Los proyectos mencionados con anterioridad permitieron realizar las obras correspondientes, formando así un equipo técnico cualificado tanto para el diseño como para la ejecución de los dispositivos de recarga gestionada "a la carta".

De los 24 sistemas de recarga intencionada ya presentados, el Grupo Tragsa ha realizado actuaciones cubriendo al menos 10 de ellos. Los principales criterios técnicos han sido incluidos en una publicación del proyecto MARSOL publicada por Tragsa y titulada *Deliverable 13.3, MAR Design and Construction Criteria*. Esta publicación se encuentra accesible en la página web del proyecto: http://www.marsol.eu/35-0-Results.html

Implementación de redes de control

Como acciones previas al monitoreo, cabe destacar el diseño e implementación de las redes de control específicas para las mayores obras mencionadas. La construcción de la red ha ido acompañada de la perforación y acabado de los piezómetros de observación en distintos contextos geológicos. Algunos han sido equipados con equipos de telemetría con personal propio. A este respecto Tragsatec cuenta con una unidad con una amplia experiencia en el diseño e instalación de estaciones meteorológicas. La unidad ha desarrollado otros tipos de estaciones por encargos específicos, tales como las de seguimiento de los parámetros de la Zona No Saturada en el acuífero Los Arenales.

Monitoreo y seguimiento

El seguimiento de las redes de control se ha llevado a cabo por dos metodologías diferentes; bien presencialmente con mediciones de los pozos a cargo del personal cualificado mediante una sonda hidronivel, o bien mediante la instrumentación de los piezómetros para su medición mediante telemetría. El diseño, adquisición, instalación y programación de todos los elementos necesarios se ha convertido en una tarea habitual de ciertas unidades del Grupo, que actualmente cuentan con personal altamente especializado.

Actualmente prosigue el seguimiento de la instrumentación instalada durante el proyecto MARSOL de tres piezómetros de observación con sensores para la medición del nivel del agua y de ciertos parámetros de calidad, con te-

Figura 29. Sondeo de recarga adherido a una balsa de riego como medida de seguridad para aliviar posibles inundaciones empleando los excedentes para la recarga de un acuífero kárstico. En su primer test el dispositivo admitió un caudal de 1.000 l/s durante más de ocho horas (a) fotos por cortesía de J.M. Montes. Perforación de un sondeo con fines medioambientales (barrera hidráulica positiva contra la intrusión marina) (b).

Figura 30. Dique perforado en Cataluña y canal de recarga gestionada en Villeguillo, Los Arenales (Valladolid).

Figura 31. El funcionamiento de las válvulas disipadoras de energía debe ser monitoreado para su reemplazo en las labores de mantenimiento, al ser un elemento sensible.

Figura 32. Proceso de instalación de sensores en piezómetros para el monitoreo de la red de control y de otros parámetros relacionados con la Zona No Saturada y la calidad del agua mediante telemetría.

le-volcado en tiempo cuasi-real para una de ellas. Asimismo se están monitoreando los caudales derivados de los cauces fluviales (en cooperación con las comunidades de regantes) y de los volúmenes infiltrados en cada ciclo de recarga gestionada.

Además se han realizado herramientas, *scripts* de programas informáticos específicos y de modelos matemáticos de flujo para la elaboración automática de cartografías a partir de los datos recopilados, también automáticamente mediante telemetría.

Es conveniente llevar a cabo un seguimiento de las depuradoras con capacidad de tratamiento suficiente para cumplir el RD 1620/2007 y estudiar su cercanía a las "zonas MAR" o zonas susceptibles de aplicar esta técnica en el territorio nacional, considerando aspectos tanto cuantitativos como cualitativos. Tragsa tiene plena capacidad para cubrir este reto si fuera preciso.

Formación y talleres de capacitación

El Grupo Tragsa actualmente cuenta con la experiencia suficiente para realizar cursos de capacitación relacionados con la recarga gestionada en cualquier país del mundo. En este contexto, nos encontramos en condiciones favorables para ofrecer este producto a distintas instituciones y ministerios a nivel internacional.

Además, ha generado una importante cantidad de material divulgativo, tales como vídeos, libros técnicos, libretos divulgativos, cuadernos tecnológicos, etcétera, diseñados para distintos "grupos diana".

Figura 33. Vídeo de soluciones tecnológicas y libro técnico realizados por Tragsa dentro del proyecto MARSOL. http://www.dina-mar.es/videos/MARenales-Film_v7.6.mp4.

Figura 34. Publicación de Tragsa-MARSOL: http://www.dina-mar.es/pdf/IF-hh7-v34c.pdf

Expectativas de futuro conforme a los planes hidrológicos de cuenca

Para ofrecer estos productos es necesario tener en consideración los once Planes Hidrológicos de Cuenca en los que se ha encontrado un compromiso de acciones futuras, (tercera etapa de planificación), en materia de recarga gestionada en el ámbito nacional, que son los del Ebro, Cataluña, Duero, Guadalquivir, Cuencas mediterráneas andaluzas, Júcar, Islas Baleares, Tajo, Guadiana y Melilla.

A pesar de la bajada de la actividad en esta línea de actuación del Grupo, motivada por la crisis económica y la reducción de encargos, las expectativas a medio plazo son muy buenas. A nivel nacional, los nuevos planes hidrológicos de cuenca (segunda y tercera etapas de Planificación) prestan una atención muy superior a esta técnica que los precedentes.

El nuevo Plan Hidrológico de la Confederación Hidrográfica del Ebro, que contempla la ejecución de 25 estudios y obras de recarga intencionada en el ámbito de su cuenca y en sectores en los que ya ha sido estudiada su viabilidad. Los sectores o acuíferos "objetivo" quedan presentados en la figura siguiente. Entre las acciones más inmediatas anun-

cia la Recarga artificial de la Masa de Agua Subterránea (MASb) del Campo de Cariñena (CHE; 0,8 M€), sin especificar la anualidad y un estudio de posibilidades de recarga artificial en la cuenca del Ebro (Aluvial del Ebro: Zaragoza, calizas de Tárrega, pliocuaternarios de Alfamén, campo de Belchite para después de 2021 por 0,03 M€.

El Plan Hidrológico del Distrito Cuenca Fluvial Cataluña en su Programa de Medidas (PdM) 2016-2021 anuncia medidas de aumento de la recarga en las MASb de la Cubeta de Sant Andreu y del Delta del Llobregat. Especifica además varios proyectos tales como el de conexión con el canal de la derecha, captación fuente de suministro del río Llobregat hasta la balsa de recarga de Sant Vicenç dels Horts; el proyecto ejecutivo de acondicionamiento y puesta en marcha de las balsas de recarga de Sant Vicenç dels Horts y Ribes (Baix Llobregat); la retirada de la capa orgánica de la balsa de infiltración de Sant Vicenç dels Horts [ACA; entre las tres: 0,72 M€] y acciones en las balsas de Santa Coloma de Cervelló [ACA; 8 M€].

El Plan Hidrológico del Duero es uno de los que presentan mayor sensibilidad ante esta técnica, y más allá de considerarla un vertido, establece Directrices para la recarga artificial en su Programa de Medidas, Anejo 12, pág. 50 y en el Art. 35.4 de su Normativa. Describe además las tres instalaciones operativas en la MASb de Los Arenales y anuncia la intención de ampliación de la recarga artificial de El Carracillo por la Junta de Castilla y León, 2016-2021.

El Plan Hidrológico de la Cuenca del Guadalquivir en segunda etapa de planificación (2015-2021), página 50, indica las finalidades principales y anuncia acciones futuras: "Después de analizar las posibles alternativas de recarga en las masas y aplicando el juicio experto al conjunto de propuestas, se llegó a la conclusión de plantear actuaciones de recarga en 17 MASb que componen el Catalogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación". Con mayor inmediatez anuncia en su Programa de Medidas (PdM) acciones en los sistemas de recarga artificial del acuífero de la Vega de Granada (pág. 43) sin determinar Administración responsable, por 10 M€, pero no concreta el horizonte temporal, previsiblemente 2016-2021.

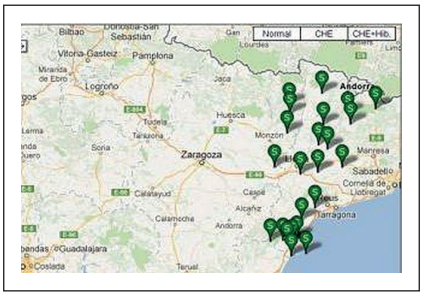
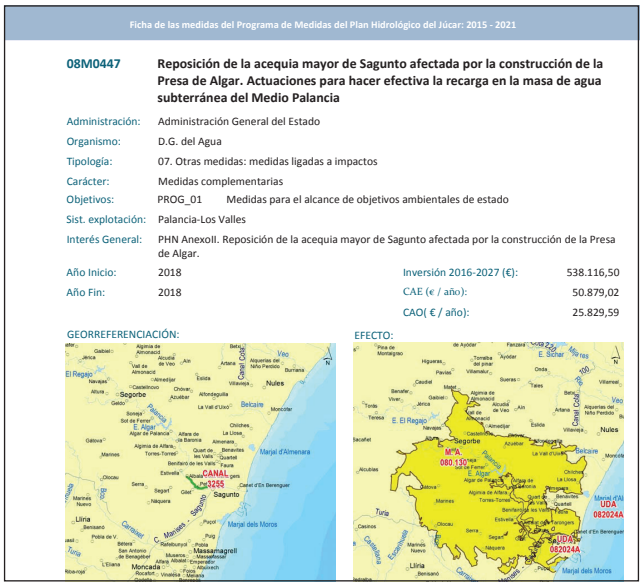


Figura 35. Futuras acciones de recarga artificial que serán implementadas por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y del Distrito Cuenca Fluvial Cataluña (tomado de PHC, 2015).

El Plan Hidrológico de las Cuencas Mediterráneas andaluzas establece en su artículo 26 de la Normativa del Plan las Directrices para la recarga artificial de acuíferos, mencionando una actuación en funcionamiento en MASb de Marbella-Estepona y anuncia en su programa de medidas la recarga artificial del Campo de Dalías (2ª fase), a ejecutar por la Administración Central por 10 M€ (uno a 2021 más nueve a 2027).

El Plan Hidrológico de la Cuenca del Júcar menciona una actuación reciente en el acuífero de La Rambleta (MASb Plana de Castellón) con capacidad para almacenar 1,5 hm^3/año y denuncia cinco MASb con presión significativa "por embalses con recarga por infiltración hacia los acuíferos". En su Programa de Medidas contempla la reposición de la acequia mayor de Sagunto afectada por la construcción de la presa de Algar; actuaciones para hacer efectiva la recarga en la MASb del Medio Palancia (DGA; 2018; 0,54 M€) (pg. 46) y el estudio de posibles recargas artificiales a partir de distintas fuentes de recursos (CHJ; 2019-2023 por 0,054 M€) (pág. 71).

El Plan Hidrológico de las Islas Baleares declaró las actuaciones de recarga artificial de interés general en el RDL 8/1993. Considera este tipo de acciones en los Artículos 70 a 72 de la Normativa del Plan. En el Plan anterior ya contemplaba la recarga artificial acuífero S'Estremera (ya en funcionamiento, con una media de 3,3 hm^3/año), y el proyecto de recarga del acuífero de Crestatx. En su PdM (anexo 8) anuncia además acciones inminentes para el estudio de viabilidad de la recarga artificial en Sencelles (0,02 M€); otro estudio piloto de almacenamiento y recuperación (0,06 M€ entre 2015-21 y 2021-27) y proyectos piloto de recarga artificial por 0,95 M€ en el periodo 2021-27 (pág. 38).


Ficha de las medidas del Programa de Medidas del Plan Hidrológico del Júcar: 2015 - 2021

08M0447 **Reposición de la acequia mayor de Sagunto afectada por la construcción de la Presa de Algar. Actuaciones para hacer efectiva la recarga en la masa de agua subterránea del Medio Palancia**

Administración:	Administración General del Estado
Organismo:	D.G. del Agua
Tipología:	07. Otras medidas: medidas ligadas a impactos
Carácter:	Medidas complementarias
Objetivos:	PROG_01 Medidas para el alcance de objetivos ambientales de estado
Sist. explotación:	Palancia-Los Valles
Interés General:	PHN Anexoll. Reposición de la acequia mayor de Sagunto afectada por la construcción de la Presa de Algar.
Año Inicio:	2018
Año Fin:	2018
Inversión 2016-2027 (€):	538.116,50
CAE (€ / año):	50.879,02
CAO(€ / año):	25.829,59

GEORREFERENCIACIÓN: EFECTO:

Figura 36. Actuaciones necesarias en la presa del Algar para hacer efectiva la recarga en la masa de agua subterránea del Medio Palancia (PHJ, 2018, pág. 483).

El Plan Hidrológico de la Cuenca del Tajo cuantifica dos presiones sobre MASb por recarga artificial y menciona en su Programa de Medidas, entre las actuaciones en aguas subterráneas del CYII para abastecimiento, el "Plan de Recarga" (Comunidad de Madrid; sin especificar inversión).

El Plan Hidrológico del Guadiana incluye dos estudios de recarga artificial en el Alto Guadiana (Apéndice 3 del Anejo 11-Programa de Medidas). Menciona además un análisis de alternativas para la captación (OPH) y la elaboración de un informe relativo a propuestas sobre posibles actuaciones en su cuenca (encomendado al IGME). Se mencionan además actuaciones ocasionales aguas abajo de Argamasilla de Alba.

El Plan Hidrológico de Melilla en su PdM anuncia el estudio de la posibilidad de realizar operaciones de recarga artificial de acuíferos con recursos procedentes de episodios esporádicos lluviosos intensos y/o de aguas residuales con depuración terciaria (CHG, 30.000 €).

La totalidad de los PHC puede ser consultada en https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/planes-cuenca/default.aspx

Campañas de difusión y acciones de sensibilización

Desde la unidad de innovación, y en estrecha comunicación con las unidades productivas, se planifican y desarrollan Planes y Programas de difusión y transferencia tecnológica, específicamente adaptados para cada línea de producto, proceso o servicio. A este respecto fue desarrollada una metodología específica durante el proyecto DINA-MAR. La explicación detallada consta en el artículo científico: Environ Earth Sci (2013) 70: 2009. https://doi.org/10.1007/s12665-013-2711-6.

Gestión hídrica en "zonas MAR"

Las actuaciones realizadas han requerido un seguimiento posterior, así como importantes acciones de mantenimiento. En general son dispositivos "vivos" que cuentan además con progresivas ampliaciones. Los principales parámetros de gestión han sido intensamente desarrollados en una nueva publicación realizada dentro del proyecto MARSOL, en este caso en colaboración con otros socios del mismo. Dicha publicación se titula: "Deliverable 13.3, MAR Technical Solutions" en http://www.marsol.eu/35-0-Results.html

9. Ventajas competitivas

La principal ventaja competitiva es la experiencia acumulada durante 40 años, así como la atención prestada a ciertos aspectos técnicos que conviene mencionar. Buena parte de ellos se apoyan en la utilización de elementos pre-existentes y en una mentalidad recicladora, actitudes agrupadas con la etiqueta "multifuncionalidad".

Multifuncionalidad

Carácter reciclador

El uso de elementos pre-existentes es una solución tecnológica de primer orden, que permite abaratar costes y reutilizar elementos cuya clausura podría representar un coste importante. Al mismo tiempo se puede cumplir una doble función de recarga y uso ambiental, al realizar una integración o restauración paisajística pasando de un hueco minero abandonado (en general areneros) y foco potencial de contaminación a un humedal infiltrante y biodepurador.

A pequeña escala, cabe mencionar la reutilización de pozos secos, habiendo acuñado el slogan *do not close a well, reuse it*. La incorporación de pozos abandonados al sistema de recarga, su relleno con grava y pequeñas adaptaciones han permitido su integración en el medio, el uso del terreno superficial que ocupaban y, a su vez, llevan a cabo una recarga inducida e invisible.

Aprovechamiento de infraestructuras pre-existentes

A mayor escala cabe mencionar la reutilización de elementos relacionados con la construcción y la actividad minera, tales como pozos secos, areneros, canteras, bocaminas, etc., cuya clausura puede resultar gravosa y su permanencia peligrosa al ser puntos de conexión directa con el acuífero. Su reutilización como balsas de infiltración abarata costes de movimiento de tierras, etc. y otorga a estos elementos un interés medioambiental.

Otros elementos han sido empleados en casos específicos, tales como el trazado de arroyos secos en la actualidad o viejos canales de conducción, que son reutilizados para la recarga intencionada del acuífero con garantía de que el agua fluye por gravedad sin necesidad de realizar estudios de micro topografía.

Diversidad de usos

A pesar de que la finalidad de estos dispositivos e infraestructuras es el almacenamiento adicional de agua en los acuíferos, en varias ocasiones con fines puramente estratégicos, las construcciones generadas permiten ampliar los usos del territorio asociado al desarrollo rural, e incluso han brindado opciones adicionales de uso público, uso recreativo, uso medioambiental, etc.

Por ejemplo, algunas de las balsas de infiltración construidas se han realizado en lugares relativamente secos, lo que resulta una atracción para los habitantes del lugar, que visitan estos cuerpos de agua. Esta curiosidad hidrogeológica también constituye una fuente de atracción de expertos, estudiantes, profesionales, ecologistas, etc.

Diversificación de las fuentes de toma

Cualquier proyecto de recarga gestionada requiere, de manera muy sintética, cuatro requisitos básicos, que son: contar con una fuente de agua con una cierta garantía, con un medio receptor para su almacenamiento, que el contexto legal permita la actividad y unos recursos económicos suficientes para su implementación.

De este modo, la diversificación de las fuentes de toma, es decir, la posibilidad de captar agua de diferentes orígenes en distintos periodos del año, incrementa la posibilidad de éxito técnico de cada sistema. Las fuentes de toma más habituales son:

Figura 37. Hueco minero de dos areneros para la extracción de áridos, rehabilitados y reutilizados como balsa de infiltración con pequeñas variaciones.

Figura 38. Balsas de decantación/infiltración con su válvula de disipación de energía.

Excedentes hídricos fluviales

La derivación del excedentes hídricos de origen fluvial salvaguardando un caudal ecológico constituye una de las alternativas más viables y recurrentes, sí bien, al tratarse de un método intermitente y temporal, la garantía de suministro es baja, y queda supeditada a la climatología. La sostenibilidad del sistema, por tanto, está amenazada por el cambio climático y la concurrencia de eventos climáticos extremos con frecuencia creciente.

Igualmente resulta importante estudiar los efectos ambientales, especialmente aquellos diferidos (producidos aguas debajo de la fuente de toma a una distancia indeterminada o de impactos inmediatos imprevisibles) y en el medio y largo plazo.

La dependencia exclusiva de excedentes fluviales para actuaciones de recarga gestionada, hoy por hoy, no garantiza su continuidad futura, de ahí la conveniencia de combinar este recurso con otros adicionales.

Efluentes de depuradoras

Los efluentes de depuradoras debidamente purificados constituyen la única alternativa de suministro permanente para operaciones de recarga intencionada. Dependiendo de la fuente originaria del proceso de depuración, el efluente resultante puede tener calidades muy diversas, especialmente si hay presencia industrial. Es una práctica habitual su mezcla con aguas de otros orígenes previamente a su infiltración en el acuífero, aunque esta práctica no siempre es viable.

Por bueno que sea el proceso de depuración, las aguas resultantes suelen ser muy inestables iónicamente y suelen requerir un post-tratamiento. Este se lleva a cabo bien en la propia planta depuradora; en la cabecera del dispositivo de recarga; o bien *in itinere,* es decir, el agua es sometida a tratamientos de manera simultánea a su flujo por las conducciones.

En general, la práctica de usar aditivos químicos como cloro, iodo o agua oxigenada es evitada en la mayoría de las experiencias, por la liberación de iones nocivos libres a los acuíferos y por los sinergismos que se generan en reacciones consecutivas.

Figura 39. Efluentes de una depuradora por lagunaje mezclado con aguas fluviales en el propio canal de recarga gestionada para alcanzar el estándar de calidad exigido.

Escorrentía superficial

Se trata de otra fuente de suministro intermitente y temporal cuya calidad es muy dependiente de la zona de captación. La escorrentía de carreteras o de aeropuertos suele contar con importantes concentraciones de, por ejemplo, hidrocarburos; mientras que en zonas rurales la presencia de sólidos en suspensión suele ser bastante elevada. De este modo, se trata de una alternativa adicional a ser combinada con otras fuentes de toma.

Otros

En este grupo se incluyen las restantes fuentes de toma que en general corresponden a excedentes hídricos, bien de desaladoras, plantas de tratamiento de agua potable, retorno de regadío (que de manera habitual presentan una sobrecarga de nutrientes), y muy especialmente, los caudales excedentarios de avenidas o inundaciones, que en general requieren amplias zonas de almacenamiento temporal para ser decantados antes de proceder a su infiltración en el terreno.

Integración en el planeamiento y en la ordenación territorial

Entre los 25 sistemas de recarga inventariados y presentados en el capítulo 5, existen varios que son intercalados en el circuito de las aguas en su ciclo hidrológico natural, y que contribuyen de manera pasiva a la infiltración de las aguas en el acuífero. Algunos ejemplos son los diques de retención, habitualmente construidos en la cabecera de las cuencas y que en ocasiones son polivalentes. Por ejemplo, hay diques para la laminación de avenidas, que simultáneamente, provocan una infiltración adicional de agua en el acuífero por simple retención de la misma.

Otros elementos de interés son los humedales artificiales y las cuencas de almacenamiento temporal de aguas excedentarias. Estas cumplen una función doble, que es prolongar el tiempo de concentración para su utilización posterior y mejorar (por lo general) la calidad de las aguas originarias para el uso previsto, que es la recarga intencionada de los acuíferos.

En el ámbito urbano, existe un amplio abanico de posibilidades para retener, tratar e infiltrar el agua en el acuífero que subyace a muchas ciudades. Estos acuíferos reciben una infiltración muy inferior a la natural, debido al alto escorrentía que provocan los pavimentos y las superficies impermeables (terreno "improductivo"). Las posibilidades son múltiples, y a este respecto ha habido numerosas actuaciones llevadas a cabo por el Grupo Tragsa bajo la denominación Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible o SUDS.

Al respecto de esta temática, el Grupo Tragsa cuenta con dos publicaciones propias como resultado de los proyectos de I + D + i (GIAE y EDISOS), además de haber estado presente la hidrogeología urbana como una línea de acción adicional en los proyectos de recarga gestionada. La última publicación de esta temática puede ser descargada del enlace https://bit.ly/2ynLt8Q tanto en español como en inglés, y está previsto publicar una segunda edición.

Costes

En la actualidad no hay habilitado ningún sistema para calcular los costes de un dispositivo de recarga gestionada de manera automática.

El visor cartográfico DINA-MAR cuenta con una cobertura de precios unitarios estimados a partir del dispositivo que resulta más idóneo para cada zona conforme al método de cálculo aplicado.

En algunas publicaciones del grupo aparecen además los costos de algunas de las obras realizadas. Un ejemplo para la cubeta de Santiuste se encuentra en la publicación http://www.dina-mar.es/pdf/IF-hh7-v34c.pdf

Figura 40. Ejemplos de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible o SUDS en Madrid. Drenaje subterráneo sobre fondo permeable y alcorque de un árbol adaptado para incrementar la infiltración al suelo-acuífero.

Dada la alta variabilidad de los costes de los diques y dispositivos de parada según las condiciones ambientales de su lugar de construcción, todavía no contamos con un glosario de precios unitarios adicional a Presto-Tragsa.

Impactos

Con respecto a los impactos ambientales previsibles en cualquier actuación de recarga gestionada (=artificial) de acuíferos, y ante la dificultad de identificar y evaluar los impactos diferidos y los que se puedan producir en el medio y largo plazo, el Grupo ha desarrollado y publicado metodologías específicas para determinadas actuaciones.

Por ejemplo, cabe destacar el libro de impacto ambiental en zonas regables, el libro resultado del proyecto de I+D+i EARSAC, que cuenta con un capítulo específico para zonas regables con aguas regeneradas en depuradoras para las condiciones ambientales del arco mediterráneo. Con mayor grado de detalle, cabe destacar el entregable del proyecto MARSOL *Appropriate MAR methodology and tested knowhow for the general rural development,* accesible en Internet en la dirección http://www.marsol.eu/35-0-Results.html. La publicación fue planteada mediante binomios problema-solución y mediante tablas de identificación de impactos para los distintos factores y procesos agrupados mediante factores del medio.

10. Estrategia del Grupo Tragsa en la recarga gestionada de acuíferos

En los últimos años la aceptación de esta tecnología es palpable y creciente. La recarga "artificial" ha entrado en una buena parte de los planes hidrológicos de países de Centro y Sudamérica, tales como México, Chile, Perú, Nicaragua, etc. En estos países hay una creciente actividad e interés en esta técnica. En otros lugares del mundo también hay una fuerte demanda. Cabe citar, por ejemplo, la publicación de licitaciones internacionales muy recientes para actuaciones en países áridos tales como Túnez, Mongolia y Afganistán.

Esta creciente demanda y la aceptación del paradigma, escasamente cuestionado, de que esta tecnología constituye un mecanismo de adaptación al cambio climático, mediante el aprovechamiento de precipitaciones extremas, reduciendo la evaporación y eutrofización de volúmenes de agua almacenados ante la insolación y amortiguando el impacto de las sequías, ha llevado a grandes empresas constructoras a mostrar un mayor interés en la implementación de dispositivos MAR.

Expertise del Grupo

En los 40 años de historia del Grupo Tragsa se han desarrollado numerosas actuaciones relacionadas con la recarga gestionada y con su integración en esquemas de gestión hídrica conjunta. La formación de un buen número de profesionales de la plantilla permite competir con los departamentos recientemente constituidos por grandes empresas constructoras, con la ventaja competitiva de haber acumulado una gran experiencia en todas las etapas de implementación, desde el anteproyecto al monitoreo y seguimiento, pasando por la ejecución del proyecto y de la obra.

Servicio público indispensable y medio propio

La Administración General del Estado considera esta alternativa como una tecnología sólida y a tener en cuenta, conforme a menciones en publicaciones oficiales tales como el Libro Blanco del Agua en España y en los recientes Planes Hidrológicos de Cuenca. De este modo, un Medio Propio, como servicio público indispensable,

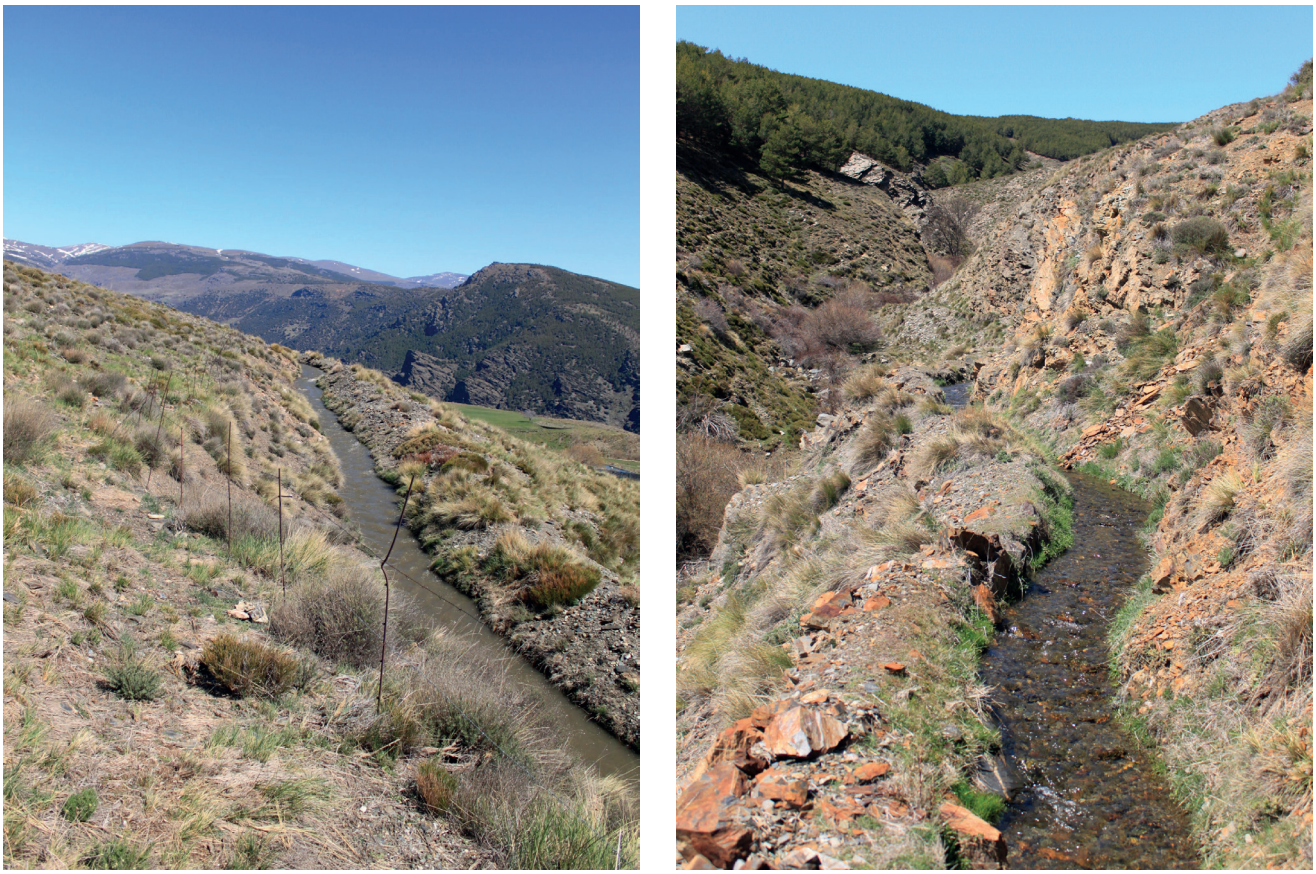


Figura 41. Reparación y mantenimiento del sistema de recarga gestionada considerado pionero en España y en Europa. Las acequias de careo de Sierra Nevada. Acequia de Bérchules.

debe contar con la capacidad necesaria para dar respuesta a las peticiones que pueda plantear el Gobierno en esta línea de acción.

Responsabilidad social

A tenor de todas las razones expuestas, la mejora de las técnicas de gestión hídrica responde a una necesidad social responsable.

Al término del proyecto de I+D+i MARSOL, la mayor parte de sus miembros de primera línea hicieron públicas sus principales conclusiones tras tres años de investigación y produjeron un vídeo donde hicieron constar las mismas, cuyo montaje y difusión fue realizado por el Grupo Tragsa. La responsabilidad social es inherente a la mayor parte de las conclusiones del proyecto, que son:

- La técnica MAR funciona, pero se necesitan más expertos para implementarla.
- La técnica MAR es ahora una tecnología contrastada.
- La técnica MAR es una solución clave para los ecosistemas que dependen del agua subterránea.
- La técnica MAR es una estrategia viable, segura y sostenible que puede ser usada con toda confianza.
- MARSOL ha contribuido a crear una nueva generación de gestores del agua, quienes cuentan con una opción adicional.
- La sensibilización y la aceptación de las soluciones MAR han aumentado considerablemente por parte de los usuarios finales.
- La técnica MAR es una de las mejores actividades para combatir los efectos adversos del cambio climático.

La Administración General del Estado considera esta alternativa como una tecnología sólida y a tener en cuenta, conforme a menciones en publicaciones oficiales tales como el Libro Blanco del Agua en España y en los recientes Planes Hidrológicos de Cuenca.

Seguimiento de los trabajos previos

Algunas actuaciones de recarga gestionada llevadas a cabo por el Grupo Tragsa en España son las mayores realizadas en el país (acuífero de Los Arenales y canal del Guadiana). Su monitoreo y seguimiento llevado a cabo por encargo de las Confederaciones Hidrográficas responsables, han traído una importante retroalimentación a los técnicos que participaron en su desarrollo.

Comprobación de la idoneidad de las actuaciones

Primeramente los diseñadores han podido comprobar la efectividad de las actuaciones realizadas en el medio y largo plazo, chequeando qué medidas funcionan adecuadamente y cuáles requieren ajustes y mejoras en su diseño para lograr una mayor efectividad en su funcionamiento, cuyo fin último es alcanzar máximas tasas de infiltración en el menor tiempo posible.

Aprender de los errores

Asimismo, el monitoreo y seguimiento ha permitido aprender de nuestros errores, al haber una estrecha relación entre los diseñadores y ejecutores de las obras y los técnicos que han llevado a cabo su seguimiento, control, mantenimiento y difusión de las actividades y de las lecciones aprendidas. Este aprendizaje está permitiendo, además, contribuir directamente en el grupo de trabajo que está desarrollando la futura directiva europea de reutilización de las aguas y recarga gestionada.

11. Vínculos con otras actividades nacionales e internacionales

IAH-MAR Commission

El Grupo Tragsa cuenta con un representante en la comisión de recarga gestionada de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH), plataforma amiga que contribuye al fomento de actividades y capacidades relacionadas con la tecnología MAR: https://recharge.iah.org/contact-us

Relación con la industria y beneficiarios potenciales del GT *MAR to MAR-k€t*

El Grupo Tragsa es socio activo del grupo de acción de la EIP del agua (Environmental Innovation Partnership) "MAR Solutions", estudiando las distintas posibilidades y alternativas de acercamiento a la industria, y muy especialmente a la agroindustria. Asimismo participa en el grupo de trabajo MAR to MAR-k€t, que tiene la misma finalidad pero con alcance internacional: https://recharge.iah.org/mar-to-market.

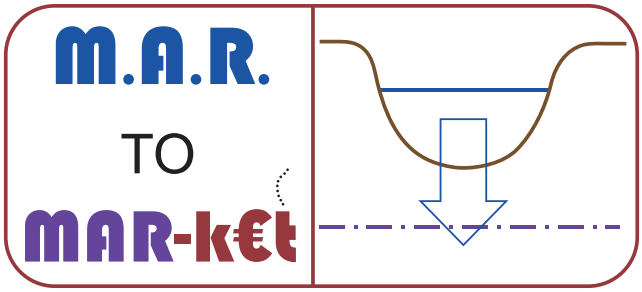


Figura 43. Logotipo del grupo de trabajo *MAR to MAR-k€t*.

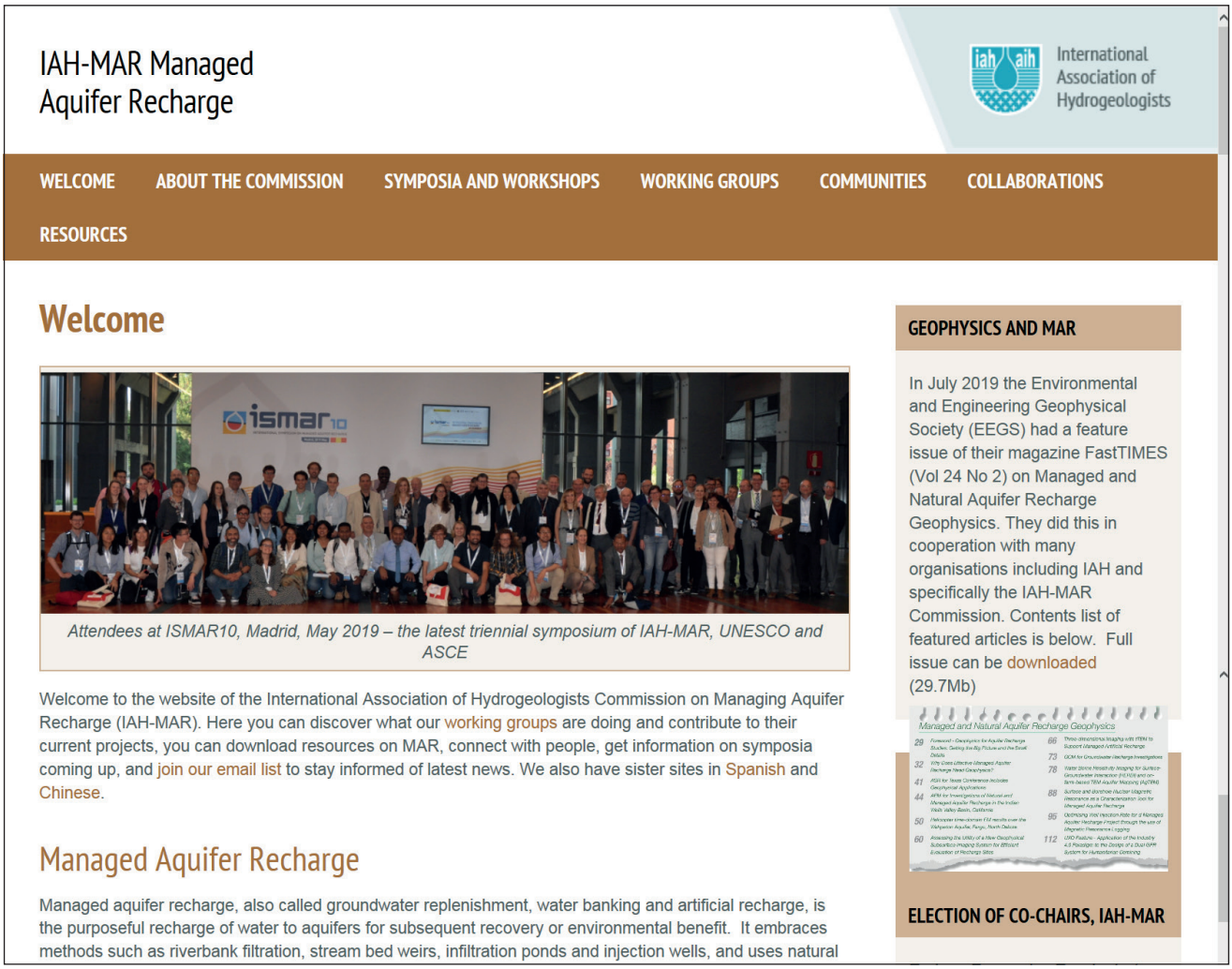


Figura 42. *Commission on Managing Aquifer Recharge* de la IAH. https://recharge.iah.org/

Marca España Agua

El acercamiento de esta metodología a la Marca España Agua se están llevando a cabo a través de la Plataforma Tecnológica Española del Agua (PTEA), en las que el Grupo tiene presencia en su Junta Directiva y en su Secretaria Técnica. Esta asociación cuenta con vínculos de conexión con otras Plataformas Tecnológicas Europeas (PTEs) contribuyendo activamente las labores de difusión a través de sus múltiples canales, y participando en sus distintos desarrollos, tanto a nivel nacional como europeo.

Figura 44. Logotipo de los proyectos cuyos coordinadores apoyaron la candidatura del ISMAR 10, quedando constituida una plataforma de trabajo sobre MAR.

Contribución a tareas de diseminación y demostración de nuestras capacidades (ISMAR10)

Como colofón a la experiencia del Grupo y en aras de su desarrollo de negocio a nivel internacional (y especialmente en Sudamérica, donde la recarga "artificial" es considerada en la legislación de la mayoría de los países que están implementando dispositivos en la actualidad), se ha celebrado en mayo de 2019 en Madrid el congreso ISMAR 10 (International Symposium on Managed Aquifer Recharge), el más relevante en esta temática a nivel mundial, organizado por Tragsa (www.ismar10.net).

El congreso se celebra cada tres años bajo los auspicios de la UNESCO, la IAH y la Asociación de Ingenieros Civiles de Estados Unidos (ASCE). El Grupo contó con el apoyo del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), el Canal de Isabel II y los coordinadores de 14 proyectos europeos relacionados con esta tecnología y agrupados en una red de soporte del Congreso ISMAR 10.

Este congreso contó con la presencia de 280 técnicos inscritos, quienes pudieron compartir nuestro *expertise* en esta táctica.

Hasta 2022 está prevista la participación en la European Training Network (ETN) MARSOLut.

Figura 45. *Banner* inicial utilizado para la presentación de la candidatura para la organización del *International Symposium on Managed Aquifer Recharge,* ISMAR 10.

12. Resumen. La recarga gestionada como línea de acción del Grupo Tragsa

Aún con el riesgo de "objetivar" en exceso una tecnología tan valiosa, la gestión de la recarga puede ser considerada una línea de producto, al menos, en los siguientes aspectos:

Producto real…

- **Disponible:** Producto adaptado al Grupo Tragsa: estudios previos, diseño de proyectos y ejecución de obras. Experiencia contrastable.
- **Capacitado:** Técnicos formados y operativos en recarga en el Grupo desde los años 80 y con capacidad para incrementar su producción. Formación de 12-15 expertos adicionales gracias a los proyectos de I+D+i.
- **Multifuncional:** Integración en planificación hidrológica y proyectos de riego, obras hidráulicas y depuración. Obras de ingeniería para dispositivos superficiales, sondeos, depuradoras, balsas, canales… Desarrollo de sinergias.
- **Publicitable:** Importancia de realizar jornadas técnicas en las Confederaciones Hidrográficas que prevén actuaciones en sus respectivas cuencas, e.g. la CHE (el nuevo PHC ha comprometido la realización de 25 obras de recarga). Se deberán emplear indicadores comparables con otras tecnologías de gestión hídrica, cambio climático y economía circular.
- **Comercializable:** A nivel nacional e internacional. Clientes habituales del grupo (confederaciones/demarcaciones/diputaciones, Dirección General del Agua (DGA), organismos de gestión del agua, consejerías de agricultura, ayuntamientos, etc.).

… De aplicación internacional…

- **Extensible:** Mediterráneo, África Subsahariana y Sudamérica. Recientes convocatorias internacionales y licitaciones para Afganistán, Mongolia, Chile, Túnez…
- **Posicionado:** Presencia de Tragsa en instituciones de relevancia internacional. Organizadores del último Congreso Internacional ISMAR 10 en 2019.
- **Visible:** Disponibilidad para visitar obras en funcionamiento de Tragsa en Guadiana, Los Arenales, etc. con técnicos de todo el mundo.

… Y con visión de futuro

- **Financiable:** La técnica avanza rápido en gran parte del mundo. En EEUU ya hay 600 dispositivos, la percepción es creciente (la Unión Europea financia 14 proyectos europeos de recarga) con nuevas convocatorias abiertas que incluyen la técnica MAR en sus topics (PRIMA, ERA-NET…).
- **Legislable:** Importancia de contribuir en la nueva directiva de reutilización, en el GT de modificación de la DMA (Common Implementation Strategy o CIS), en la próxima reforma de la ley de EIA y las actualizaciones de los PPHH en la tercera etapa de planificación.
- **Sólido:** Criterios de peso sociales, técnicos, económicos y ambientales para fomentar una técnica sostenible con asociación directa a la lucha contra los efectos del cambio climático como mecanismo de adaptación.

Maldonado, 58
28006 Madrid
España
Tel.: +34 91 396 34 00

informacion@tragsa.es
www.tragsa.es

GrupoTragsa
Garantía Profesional. Servicio Público

30 Aniversario Tragsatec 1990-2020

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

SEPI