

# **REUTILIZACIÓN DEL AGUA Y GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS**

Aspectos conceptuales, técnicos, reglamentarios y de gestión

Rafael Mujeriego  
Catedrático de Ingeniería Ambiental (jubilado)  
Universidad Politécnica de Cataluña  
rafael.mujeriego@upc.edu



## **REUTILIZACIÓN DEL AGUA Y GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS**

Aspectos conceptuales, técnicos, reglamentarios y de gestión

Rafael Mujeriego  
Catedrático de Ingeniería Ambiental (jubilado)  
Universidad Politécnica de Cataluña  
rafael.mujeriego@upc.edu

### **RESUMEN**

La reutilización planificada del agua es un componente esencial de la gestión integrada de los recursos hídricos, en cuanto puede contribuir de forma significativa al aumento neto de los mismos. El progreso de la reutilización planificada del agua no depende únicamente de los avances tecnológicos. La existencia de un marco legal y reglamentario específico y el impulso de una voluntad política de llevarla a cabo son factores determinantes del desarrollo de la reutilización. La experiencia de Paneles de expertos seguida en California, en un marco de gran receptividad por parte de las instituciones responsables de salud pública y de recursos hídricos, ha resultado en un desarrollo espectacular de normativas pioneras para diversas formas de reutilización. El agua regenerada ofrece una garantía de suministro muy superior a la de las fuentes convencionales, especialmente en zonas semi-áridas. Los Organismos de Cuenca ofrecen un marco óptimo para implantar la gestión integrada de los recursos hídricos, permitiendo que los requisitos económicos y financieros de la reutilización se integren en el balance global de costes y beneficios de la cuenca. La regeneración de agua para usos no potables ha adquirido un gran desarrollo en numerosas partes del mundo, en particular en las zonas costeras e insulares españolas, donde ha alcanzado unas excelentes cotas de fiabilidad y de aceptación por parte de los usuarios y del público en general. La reutilización potable indirecta (RPI) es un concepto innovador con un objetivo común: generar una fuente de agua no convencional, alternativa o nueva, más fiable frente a la irregularidad meteorológica (mayor auto-suficiencia), dotándola de una de las dos opciones de “naturalidad” posibles: un acuífero costero o un embalse de regulación. La regeneración potable directa (RPD) comienza a ser considerada como una opción necesaria en determinadas zonas del mundo desarrollado, especialmente ante la necesidad de recursos que se plantean durante las sequías pluri-anales y la conveniencia de mejorar la eficiencia energética de la explotación de los sistemas de tratamiento y distribución del agua. Las infraestructuras de regeneración avanzada disponibles en el Área Metropolitana de Barcelona ofrecen un referente inigualable para implantar un ambicioso programa de seguimiento e investigación con el que impulsar la auto-suficiencia y generar una nueva competencia científica y técnica internacional. Un gran acuerdo marco entre los usuarios urbanos, agrícolas, industriales y de ocio es una vía muy favorable para satisfacer las necesidades de agua para el abastecimiento público, la preservación ambiental, el regadío y el uso industrial. Conviene plantearse un cambio cualitativo en la gestión del agua regenerada: estimar su valor, en lugar de limitarse a cuantificar su coste. El coste de las opciones alternativas, como trasvases, desalación y especialmente las medidas de urgencia para paliar las sequías ha puesto de manifiesto las considerables ventajas de la reutilización planificada del agua.

### **INTRODUCCIÓN**

La reutilización del agua es un componente intrínseco del ciclo natural del agua. Mediante el vertido de efluentes depurados a los cursos de agua y su dilución con los caudales circulantes,

las aguas residuales depuradas han venido siendo reutilizadas incidentalmente en puntos aguas abajo de los cauces para aprovechamientos urbanos, agrícolas e industriales. La reutilización directa o planificada del agua a gran escala tiene un origen más reciente (mitad del siglo XX) y supone el aprovechamiento directo de efluentes, con un mayor o menor grado de tratamiento, mediante su transporte hasta el punto de utilización a través de un conducto específico, sin mediar para ello la existencia de un vertido o una dilución en un curso natural de agua.

El notable desarrollo alcanzado por la reutilización planificada del agua, especialmente en países con recursos hídricos suficientes, se ha debido fundamentalmente a dos causas: 1) la necesidad de ampliar los abastecimientos de agua y 2) la necesidad de mejorar la gestión de los vertidos de aguas depuradas. El incremento registrado por las dotaciones de agua de abastecimiento, junto con el aumento de población experimentado por numerosas zonas urbanas, especialmente de carácter metropolitano, y la mayor sensibilidad ambiental respecto a la protección de los cursos naturales de agua han hecho que las fuentes de abastecimiento tradicionales sean insuficientes para atender las actuales demandas de agua. Las distancias crecientes entre las nuevas fuentes de abastecimiento y los núcleos urbanos, las limitaciones ambientales para construir nuevos embalses y las sequías plurianuales han llevado a numerosas poblaciones a plantearse la utilización del agua regenerada como fuente adicional de agua para aprovechamientos que no requieran una calidad de agua potable. Por otra parte, las crecientes exigencias sanitarias y ambientales sobre la calidad de las aguas continentales y marinas, junto con los requisitos de ubicación y los niveles de tratamiento cada vez más estrictos impuestos a los vertidos de los efluentes depurados han hecho que su regeneración adicional permita convertirlos en una nueva fuente de suministro de agua, económica y segura desde tanto desde el punto sanitario como ambiental.

El objetivo de este capítulo es analizar el papel que la regeneración y la reutilización planificada del agua tienen en la gestión integrada de los recursos hídricos, especialmente en relación con su capacidad para promover la autosuficiencia de recursos hídricos en zonas semi-áridas y con déficits crónicos, como las zonas costeras mediterráneas españolas. Los objetivos específicos de este capítulo son: 1) describir el marco conceptual de la reutilización planificada, 2) analizar los beneficios y las exigencias de la reutilización planificada, 3) presentar los diferentes usos del agua regenerada y los procesos de tratamiento utilizados para la regeneración básica y la regeneración avanzada del agua, 4) analizar el papel de la reutilización, la regulación y la desalación como elementos de la gestión integrada del agua, 5) describir diversas iniciativas pioneras e innovadoras en el campo de la reutilización potable indirecta (RPI), 6) plantear posibles opciones de la reutilización potable directa (RPD) en el contexto de las sequías y la eficiencia energética, 7) valorar el coste de la reutilización planificada en la gestión integrada de los recursos hídricos en España, 8) analizar los condicionantes socio-económicos de la reutilización planificada en España y 9) formular diversas formas prácticas de gestión para potenciar el papel de la reutilización planificada en la gestión integrada del agua.

## **LA REUTILIZACIÓN PLANIFICADA**

El proceso de tratamiento necesario para que un agua depurada pueda ser reutilizada se denomina generalmente regeneración, se realiza en una estación de regeneración de agua (ERA) y al resultado de dicho proceso se le denomina agua regenerada. De acuerdo con su significado etimológico, la regeneración de un agua consiste en devolverle, parcial o totalmente, el nivel de calidad que tenía antes de ser utilizada, de igual manera que la regeneración de suelos y la regeneración de playas tratan de restaurar el estado y la forma que éstos tenían en el pasado (Asano *et al.*, 2006; Mujeriego, 2007, 1990). El diccionario de la RAE incluye una acepción tecnológica de la palabra regenerar que refleja muy bien este significado: someter las materias desechadas a determinados tratamientos para su reutilización.

La implantación de un proyecto de regeneración de agua tiene dos requisitos esenciales y complementarios: 1) definir los niveles de calidad aplicables a cada uno de los posibles usos que se piense dar al agua y 2) identificar los procesos de tratamiento recomendados para alcanzar los niveles de calidad del agua aplicables a cada uno de los usos previstos. La elaboración y la aprobación de los niveles de calidad aplicables al agua regenerada constituyen generalmente la faceta más discutida de todo programa de reutilización, debido a la dificultad de establecer una relación causal entre la calidad del agua regenerada y los posibles efectos sobre la salud pública y el medio ambiente. Prueba de ello son la diversidad y la heterogeneidad de los criterios y las normas de calidad establecidas por diversos países y organizaciones internacionales sobre la reutilización del agua (USEPA, 2012; OMS, 2006; Ministerio de la Presidencia, 2007; Ministère de la Santé et des Sports, 2014).

La reutilización de un agua regenerada consiste en ponerla a disposición del usuario para que éste pueda utilizarla en un aprovechamiento concreto. El aprovechamiento de un agua regenerada requiere normalmente: 1) su transporte desde la estación de regeneración hasta el lugar de utilización, 2) su almacenamiento o regulación temporal para adecuar el caudal suministrado por la estación de regeneración a los caudales utilizados por los usuarios y 3) la definición de unas normas de utilización del agua (buenas prácticas de uso) que permitan minimizar los posibles riesgos directos o indirectos para el medio ambiente, las personas que la utilizan, la población circundante al lugar de uso y los consumidores de cualquier producto cultivado con el agua regenerada. Estos tres elementos constituyen el núcleo central de un programa de reutilización planificada del agua.

## **BENEFICIOS DE LA REUTILIZACIÓN PLANIFICADA**

El balance hídrico anual de una zona geográfica se obtiene como diferencia entre el aporte de agua, constituido por las precipitaciones y las aportaciones de los ríos, los acuíferos y los trasvases desde otras cuencas, y las pérdidas irrecuperables de agua, cuyo destino es la atmósfera o el mar. Cualquier actuación destinada a conservar agua y que consiga reducir esas pérdidas irrecuperables mejorará la disponibilidad de agua para su aprovechamiento a lo largo del año. Por este motivo, la regeneración y la reutilización del agua únicamente resultarán en un incremento real de los recursos hídricos aprovechables en una zona cuando esas aguas se

pierdan de forma irrecuperable, mediante su vertido al mar desde una población costera o por evapotranspiración desde zonas del interior (Pettygrove y Asano, 1984; Mujeriego, 1990).

Aunque la reutilización del agua en zonas del territorio interior no permite la creación neta de recursos hídricos, sí ofrece la posibilidad de una mejor gestión del agua, mediante la sustitución de aguas superficiales por agua regenerada para aquellos usos que no requieran un agua de calidad pre-potable. La gestión integrada de los recursos hídricos permite utilizar el agua regenerada de muy diversas formas: 1) para reducir los consumos de recursos convencionales, mediante su sustitución por aguas regeneradas y 2) para ampliar la disponibilidad de los recursos convencionales disponibles. La designación del agua regenerada como recurso no convencional, alternativo o nuevo recurso (*NeWater*, Singapur) trata de enfatizar una o varias de esas posibles formas de gestión del agua regenerada.

La reutilización planificada del agua puede tener múltiples beneficios, entre los que cabe destacar los siguientes:

1. Una nueva fuente de suministro de agua, capaz de aportar recursos hídricos adicionales, bien sea en forma de recursos netos, o bien de recursos alternativos que permitan liberar recursos de agua de mejor calidad que puedan así destinarse a usos más exigentes, como el abastecimiento público.
2. Una disminución de los costes de tratamiento y de vertido de los efluentes depurados.
3. Una reducción del aporte de contaminantes a los cursos naturales de agua, en particular cuando la reutilización se efectúa mediante riego agrícola, de jardinería o forestal.
4. El aplazamiento, la reducción o incluso la supresión de instalaciones adicionales de tratamiento de agua de abastecimiento.
5. Un ahorro energético, al evitar la necesidad de aportes adicionales de agua desde zonas más alejadas a la de la ERA.
6. Una reducción de las aportaciones de dióxido de carbono a la atmósfera, en razón de los menores consumos energéticos.
7. Un aprovechamiento de los elementos nutritivos contenidos en el agua regenerada, especialmente cuando ésta se utiliza para riego agrícola y de jardinería.
8. Una mayor fiabilidad (garantía) de suministro. Los caudales de agua depurada tienen una garantía mucho mayor que los de la mayoría de las fuentes naturales de agua, especialmente en zonas semi-áridas como las mediterráneas españolas.
9. Un carácter local y fiable de esta nueva fuente de suministro. Los flujos de agua regenerada suelen estar próximos a las zonas urbanas, lo que evita que deban plantearse trasvases desde otras zonas. No obstante, esta misma característica puede limitar el uso del agua regenerada en zonas agrícolas alejadas de los núcleos urbanos que las generan.

En definitiva, la reutilización planificada del agua ofrece una garantía de suministro muy superior a la de las fuentes convencionales, asegurando la disponibilidad de caudales especialmente durante la temporada estival, permitiendo un aprovechamiento de los nutrientes (nitrógeno y fósforo) contenidos en el agua regenerada y potenciando una gestión más eficiente de los recursos hídricos, haciendo posible que las aguas superficiales de buena calidad puedan utilizarse para abastecimiento público. La proximidad de los caudales de agua regenerada a los núcleos urbanos ofrece una posibilidad de abastecimiento local y fiable, hasta llegar a una reutilización potable indirecta (RPI) o directa (RPD), propiciando así un aumento de su

autosuficiencia hídrica y reduciendo su dependencia de trasvases de agua desde cuencas externas, tanto si estos trasvases son tradicionales o nuevos.

La reutilización planificada del agua constituye, junto con la regulación en embalses en derivación y en acuíferos subterráneos y con el uso eficiente del agua, uno de los elementos básicos de la gestión integrada de los recursos en zonas semi-áridas como las del sur de California (Mujeriego, 2004).

## **EXIGENCIAS DE LA REUTILIZACIÓN PLANIFICADA**

Uno de los factores determinantes de la implantación y el desarrollo de la reutilización planificada del agua es el establecimiento de unas normas de calidad del agua regenerada para cada uno de los posibles tipos de aprovechamientos que se contemplen. La aprobación del RD 1620/2007, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización del agua y las normas de calidad relativas aplicables al agua regenerada, constituyó un elemento esencial del desarrollo coordinado de esta actividad en España. Mientras que el régimen jurídico aplicable a la gestión del agua regenerada se enmarca en un contexto de Organismo de Cuenca como el requerido por la Directiva Marco del Agua (las Confederaciones Hidrográficas actuales), los límites de calidad aplicables al agua regenerada para los posibles aprovechamientos están inspirados básicamente en las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud y los criterios establecidos en la Ley del Agua de California, posteriormente recogidos por la Agencia de Protección Medioambiental de los EEUU (USEPA, 2012); esos límites de calidad ya habían sido adoptados y aplicados por comunidades autónomas como Cataluña, País Vasco, Baleares y Andalucía para implantar proyectos de reutilización en décadas anteriores.

La aprobación del RD 1620/2007 significó la culminación de más de 20 años de debates y proyectos, que se plasmaron en los procedimientos administrativos para utilizar el agua regenerada y los niveles de calidad del agua regenerada requeridos para diversos usos. Esas limitaciones de calidad han sido ampliamente debatidas y cuestionadas, en unos casos por considerarlas demasiado restrictivas y en otros por estar necesitadas de un análisis de riesgo microbiológico y químico, pero sin llegar a plantear las adaptaciones prácticas adecuadas. Esa dinámica responde en gran medida a un tradicional deseo de perfección, falto del pragmatismo necesario para avanzar progresivamente en la actualización, la renovación, la adaptación y la fundamentación del texto inicial del RD 1620/2007, y a la escasa prioridad por consolidar conocimientos y experiencias en manuales propios, con normas prácticas para diseñar y explotar sucesivas generaciones de proyectos de reutilización. A esas circunstancias se ha sumado la expectativa de disponer de unas normas de calidad aprobadas por la Unión Europea, que satisfagan los deseos de los usuarios y respalden la legitimidad del uso de agua regenerada. En junio de 2018, la Comisión Europea presentó una propuesta de normativa de requisitos mínimos de calidad exclusivamente para riego agrícola, para su debate y aprobación por los diferentes Estados miembros, cuyas opiniones parecen difícilmente conciliables. Es sorprendente que España, siendo el Estado miembro con mayor potencial, desarrollo y experiencia reconocidos sobre la reutilización del agua, obtenidos durante más de 35 años de experiencia en este campo, haya optado por esperar que sean las autoridades comunitarias y los demás Estados miembros los que definan las normas de calidad que deben regir la

reutilización del agua para riego agrícola, cuando nuestra normativa es tan eficaz como la propuesta por la UE y sin duda abarca muchas más opciones de reutilización que el riego agrícola. Como se analiza en apartados posteriores, la experiencia de los Paneles de expertos seguida en California, en un marco de gran receptividad por parte de las instituciones responsables de salud pública y recursos hídricos, ha resultado en un desarrollo espectacular de normativas pioneras no solo para la regeneración básica para riego agrícola y de jardinería, sino también para la regeneración avanzada para la recarga de acuíferos y de embalses.

El transporte del agua regenerada desde la ERA hasta el punto de reutilización es una de las exigencias más costosas de cualquier proyecto de reutilización, en cuanto que requiere con frecuencia la construcción de una conducción terrestre y de una nueva o doble red de distribución, especialmente cuando se reutiliza agua en zonas agrícolas, urbanas o industriales que no disponen de una red de distribución específica previa. Por motivos económicos, la implantación de una red de distribución de agua regenerada suele realizarse de forma progresiva (mancha de aceite), empezando por los usuarios más próximos y con mayor consumo de agua, y extendiéndola después a zonas urbanas o agrícolas más alejadas y con menores consumos de agua.

Las normas de utilización del agua regenerada son un componente esencial de cualquier estrategia de protección de la calidad ambiental y de la salud pública. En general, cuanto menores sean las restricciones impuestas al uso del agua, referidas al posible contacto con personas, animales o productos comestibles, mayor será el nivel de calidad exigido al agua regenerada. De este modo, mientras que la utilización de agua regenerada para riego de jardinería por aspersión en zonas de uso público suele exigir una filtración y una desinfección del efluente secundario, el riego agrícola mediante emisores enterrados puede realizarse con agua depurada y sometida únicamente a un tratamiento mecánico, suficiente para evitar la obturación de los orificios (goteros) de salida del agua.

Las autoridades sanitarias dedican una especial atención a la definición de las normas de utilización del agua regenerada, tales como: 1) la señalización mediante carteles bien visibles en los que se indique el tipo de agua utilizada, 2) la adopción normalizada del color rosa/morado para las conducciones y los dispositivos de control, 3) la instalación de dispositivos anti-retorno, 4) las inspecciones de las conexiones a la red de agua regenerada, 5) la exigencia de determinados horarios de riego y de tipos de aspersores, 6) la prohibición de instalar grifos exteriores y 7) la utilización de tamaños de conducción y de bocas de conexión de mangueras diferentes a los utilizados para las aguas de abastecimiento público. A este respecto, la aparición progresiva de contadores en el punto de conexión del agua regenerada constituye una indicación clara del objetivo esencial de estos sistemas de distribución: la optimización del aprovechamiento del agua, en lugar de su evacuación y vertido mediante riego. La señalización utilizada actualmente en California y Florida transmite una percepción muy positiva y cotidiana de la reutilización, mediante anuncios tales como “Este sistema de riego (o de fluxores en los lavabos) utiliza agua regenerada, con objeto de ahorrar agua”.



## **FIABILIDAD DEL PROCESO DE REGENERACIÓN**

Una exigencia característica de los proyectos de regeneración de agua es la necesidad de asegurar una fiabilidad notable del proceso de tratamiento y una gestión adecuada del sistema de reutilización del agua. La circunstancia de que la reutilización del agua suele plantearse en muchos casos como la única fuente alternativa de agua para el aprovechamiento considerado, sin la protección que la dilución con agua de mejor calidad puede ofrecer y, sobre todo, el que la reutilización de un agua conlleve en muchos casos la posibilidad de un contacto directo con personas, animales o plantas, que pueden verse afectados en su salud o desarrollo, hacen que la fiabilidad de las estaciones de regeneración de agua deba ser elevada y constituya un elemento esencial tanto de su concepción como de su explotación y mantenimiento.

La fiabilidad de los procesos de regeneración pasa así a constituir un elemento esencial de la concepción y la explotación del sistema de reutilización, con prioridad sobre el rendimiento y la eficacia de los propios procesos, que han de satisfacer los límites de calidad establecidos para el agua regenerada. En definitiva, la regeneración del agua se concibe actualmente como un proceso destinado a obtener un producto de calidad, de modo muy similar al que se adopta en las instalaciones de potabilización de agua de abastecimiento público. La producción y la distribución de este producto deben plantearse en un marco más amplio que el tradicional de lucha contra la contaminación, y con una nueva mentalidad en la concepción y la explotación de los procesos de regeneración, diferente a la adoptada generalmente en la depuración del agua residual, cuyo resultado final suele considerarse un residuo líquido o sólido. Esta nueva forma de plantear la regeneración del agua ha hecho que la reutilización planificada del agua haya pasado a ser un elemento esencial de la gestión integrada de los recursos hídricos.

La creciente sensibilidad ambiental y sobre todo la protección sanitaria de las poblaciones en posible contacto con el agua regenerada están propiciando que la calidad sanitaria del agua regenerada se aproxime cada vez más, especialmente en zonas desarrolladas, a la “calidad analítica” de un agua potable, aunque ello no implique el consumo humano del agua regenerada. Esta tendencia está haciendo que la producción de agua regenerada se plantee como una actividad asimilable a la producción de alimentos (agua potable en este caso), tanto en cuanto a la calidad de las instalaciones de producción como en la formación, las responsabilidades de los operarios y los controles de calidad aplicables al proceso de regeneración. Esta adaptación es especialmente evidente en los proyectos pioneros de RPI, en los que el agua regenerada es devuelta a un medio natural controlado (acuífero o embalse), manteniendo o mejorando sus niveles de calidad, para que pueda ser posteriormente utilizada como materia prima en la producción de agua de consumo humano.

## **TIPOS DE REUTILIZACIÓN**

Atendiendo al posible contacto o ingestión del agua regenerada por parte de las personas, la reutilización se clasifica en: 1) reutilización para uso no potable y 2) reutilización para uso potable. La segunda categoría incluye las utilidades en que el agua regenerada puede ser ingerida (directa o indirectamente) por las personas en algún momento, mientras que la primera engloba todas las demás. Es importante señalar que, hasta el momento, los proyectos

de regeneración para usos no potables son los que han adquirido un mayor desarrollo en numerosas partes del mundo, donde han alcanzado unas excelentes cotas de fiabilidad y de aceptación por parte de los usuarios y del público en general. Esto es especialmente aplicable en zonas semi-áridas desarrolladas, donde los recursos hídricos son cada vez más limitados e irregulares y donde la protección ambiental es una prioridad cada vez más destacada.

El agua regenerada se viene empleando para múltiples usos, entre los que cabe destacar: 1) los usos urbanos (jardinería, suministro de aparatos sanitarios, lucha contra incendios, baldeo de calles y lavado de automóviles), 2) los usos industriales (refrigeración, agua para producción de vapor, lavado de vagones de ferrocarril), 3) el riego agrícola, de jardinería y forestal, 4) los usos ornamentales y recreativos, 5) la mejora y la preservación del medio natural (humedales), 6) la recarga de acuíferos, especialmente para una posterior RPI y 7) la RPD. La reutilización agrícola y de jardinería constituye el aprovechamiento más extendido del agua regenerada, tanto para cultivo hortícola (consumo directo) como para cultivos con procesamiento posterior, cereales, cítricos y viñedos, y tanto mediante riego por aspersión, micro-aspersión y goteo como por riego por inundación.

La reutilización potable del agua puede adoptar dos versiones bien diferenciadas: la RPI, en la que se incluye un amortiguador ambiental, bien sea un acuífero o un embalse, y la RPD, en la que el agua regenerada se utiliza directamente como fuente de agua de abastecimiento. A su vez, la RPD puede adoptar dos formas de incorporar el agua regenerada, bien sea introduciéndola en la cabecera de la estación potabilizadora de agua convencional, para que se mezcle con los caudales de otras fuentes convencionales, o bien mediante la incorporación del agua regenerada directamente a la red de distribución de agua de consumo público. Una faceta importante de esta última opción es asegurar que los caudales de agua regenerada se mezclan uniformemente con los caudales de agua de consumo humano obtenidas de fuentes convencionales, con objeto de asegurar que todos los consumidores reciben un agua de la misma composición, con una fracción similar de agua regenerada.

Como ejemplos ilustrativos de la capacidad de regeneración y de los caudales regenerados (absolutos y relativos) actualmente en diversas zonas del mundo, cabe citar que la reutilización planificada de agua en el Consorci de la Costa Brava, Girona, durante el año 2009 fue de  $6 \text{ hm}^3/\text{año}$ , lo que representó un 20 % de los  $30 \text{ hm}^3/\text{año}$  de agua depurada en sus instalaciones. La reutilización planificada de agua en California alcanzó en 2015 un caudal de  $880 \text{ hm}^3/\text{año}$  ( $825 \text{ hm}^3/\text{año}$  en 2009;  $650 \text{ hm}^3/\text{año}$  en 2001 y  $330 \text{ hm}^3/\text{año}$  en 1987). Florida dispone de una capacidad de regeneración de agua de  $1.900 \text{ hm}^3/\text{año}$  y alcanzó un nivel de reutilización en 2006 de  $915 \text{ hm}^3/\text{año}$  ( $810 \text{ hm}^3/\text{año}$  en 2001). Como se puede observar, los caudales de agua regenerada reutilizados anualmente en estas zonas son importantes. Aunque los porcentajes de reutilización total en California se situaba en torno al 10 % durante esos años, los porcentajes en ámbitos regionales más restringidos han llegado a superar el 30 %, especialmente en las zonas semi-áridas del sur. En este contexto, el 20 % alcanzado por el Consorci de la Costa Brava destaca por su posición en la parte alta de este intervalo.

## PROCESOS DE REGENERACIÓN

El proceso necesario para obtener un agua regenerada que satisfaga unos criterios de calidad similares a los propuestos por el RD 1620/2007 o la USEPA (2012) para el riego de jardinería en zonas públicas, sin ningún tipo de restricción en cuanto a la exposición y el contacto del público con el agua regenerada, consta fundamentalmente de cuatro elementos principales:

1. La implantación de un control de vertidos a la red de saneamiento que asegure la ausencia de contaminantes que puedan limitar o impedir la reutilización del agua regenerada. La segregación de los posibles flujos contaminantes y la supresión de sus aportaciones al afluente del proceso de regeneración es la forma más eficiente de evitar su presencia en el agua regenerada resultante.
2. Un tratamiento biológico secundario capaz de producir un efluente acorde con los límites de calidad establecidos en la Directiva 91/271 (DOCU, 1991), con un contenido de MES inferior a 35 mg/l y una DBO<sub>5</sub> inferior a 25 mg/l.
3. Un tratamiento posterior destinado a eliminar la MES del efluente secundario y desinfectar completamente el efluente regenerado. Este proceso de tratamiento constituye propiamente la fase de regeneración del agua. El alcance y el rendimiento del proceso de regeneración aumentan a medida que la utilización posterior del agua involucra contaminantes adicionales para los cultivos y los consumidores, y especialmente cuando se plantea para usos potables (indirectos o directos). El proceso de regeneración puede adoptar alternativas que incluyen desde procesos naturales hasta procesos convencionales y otros más tecnificados, y que pueden implantarse en instalaciones centralizadas o bien descentralizadas y próximas al punto de uso.
4. Un depósito regulador de los caudales de agua regenerada, a fin de equilibrar la producción de la ERA con el consumo de los usuarios, asegurando así una cierta reserva de agua regenerada.

Este proceso de regeneración, que podemos designar como “regeneración básica” para reutilización no potable, puede complementarse con otros procesos de tratamiento del agua, más sofisticados y específicos, tanto de tipo mecánico, físico y químico como de tipo natural, cuando se trata de realizar la RPI. A este conjunto coordinado de procesos adicionales se le suele designar como “regeneración avanzada”. El objetivo principal de la regeneración avanzada suele ser la disminución del contenido de materia orgánica disuelta, de la que forman parte numerosos contaminantes emergentes de interés como los antibióticos, los disruptores endocrinos, los productos de higiene personal y los compuestos orgánicos indeseables, y de microorganismos patógenos como los virus. La utilización de membranas de ósmosis inversa, como forma de rebajar el contenido de esos contaminantes hasta niveles casi indetectables, comporta necesariamente la disminución de sales disueltas y la mejora de la calidad inorgánica del agua. No obstante, conviene resaltar que, aunque la desmineralización del agua mediante procesos de ósmosis es el medio elegido actualmente para regenerarla, la principal preocupación del tratamiento aplicado no es normalmente el contenido salino del agua, sino su contenido de materia orgánica disuelta. Cabe pensar que, en un futuro, se dispondrá de medios eficaces para rebajar el contenido de esos contaminantes emergentes, sin tener necesariamente que desmineralizar el agua. Uno de los procesos en amplia reconsideración como opción técnica para efectuar ese cometido es la filtración en carbón activado granular.

La mayoría de los procesos utilizados para la regeneración del agua son adaptaciones de los procesos usados para su potabilización, tal como ocurre cuando se trata de potabilizar aguas superficiales afectadas por aportaciones de contaminantes (urbanos, industriales, agrícolas) vertidos en puntos aguas arriba de las captaciones. El tratado sobre *Water reuse: issues, technologies and applications*, publicado por Asano *et al.* (2006) contiene una descripción detallada de los diferentes procesos utilizados y en fase de adaptación para la regeneración del agua. El objetivo de calidad más frecuente de los procesos de regeneración básica para riego sin restricción (no potable) es la inactivación de los microorganismos patógenos contenidos en el agua afluyente (efluente depurado), aunque también puede incluir la reducción de aquellos compuestos químicos contenidos en el agua que puedan ser problemáticos para la calidad de los cultivos o los suelos.

En general, las plantas de regeneración de agua que utilizan efluentes municipales y cuyo producto está destinado a usos municipales (riego agrícola y de jardinería) e incluso industrial (refrigeración) suelen ser explotadas por los propios municipios, bien directamente o bien a través de una empresa de servicios. Estas plantas de regeneración guardan un gran parecido con las plantas potabilizadoras de agua, en cuanto que todo el personal está mentalizado sobre la necesidad de producir un agua de calidad satisfactoria y de aplicar medidas correctoras urgentes, ante cualquier alteración del proceso, para evitar que un agua de calidad insuficiente pueda salir de la ERA.

Generalmente, los municipios son los encargados de la distribución y la gestión del agua regenerada, directamente o mediante delegación a una compañía privada, constituyendo así un nuevo servicio público de calidad. La coordinación y la comunicación con los usuarios, tanto individuales como colectivos (comunidades de regantes, urbanizaciones, campos de golf), son muy directas y cordiales, a fin de detectar cualquier posible incidente y de disipar cualquier duda que pueda surgir. Por otra parte, una gestión diferenciada entre la entidad responsable de la depuración de las aguas residuales y la entidad responsable de la regeneración del agua ha proporcionado una solución bien aceptada y muy favorable en el proyecto de reutilización de agua de Vitoria-Gasteiz (Del Río *et al.*, 1996; comunicación personal, 2005).

## **REUTILIZACIÓN DE AGUA PARA RIEGO**

Cada utilización o aprovechamiento de agua tiene unas exigencias específicas de calidad físico-química y microbiológica, derivadas del destino directo o indirecto previsto para el agua utilizada. Así, el riego de parques y jardines conlleva unas exigencias de calidad físico-química del agua que permitan asegurar el normal desarrollo y mantenimiento de las especies vegetales que se desea regar. Entre los parámetros de calidad más evidentes aparecen la salinidad (medida generalmente en términos de su conductividad eléctrica), su contenido de cloruros y su contenido de boro. Estas limitaciones están claramente definidas en los manuales y estudios de riego agrícola y de jardinería, algunos de los cuales se han convertido en documentos de referencia en el campo del riego con agua regenerada (Levine y Asano, 2004; Asano, 1998; Mujeriego, 1990), y de las buenas prácticas de gestión de la jardinería y del cultivo agrícola en general (Sala y Millet, 1995). Los límites establecidos en estas normas no son generalmente estrictos y varían en función de las especies vegetales en cuestión. La

experiencia agronómica disponible permite ajustar el uso del agua regenerada a las posibles oscilaciones de estos parámetros de calidad, sin por ello alterar significativamente la calidad de los cultivos regados.

Mientras que la existencia de redes secundarias de distribución de agua regenerada para regadío es muy limitada, o inexistente en Europa, la explotación de redes secundarias de este tipo de agua de riego es una práctica muy común en numerosos municipios de California, Florida e incluso Japón, donde constituye una faceta cotidiana de los servicios de distribución de agua y saneamiento, y donde el público acepta e incluso promueve abiertamente esta práctica dentro de sus municipios. Las Jornadas sobre La Integración del Agua Regenerada en la Gestión de los Recursos, celebradas en octubre de 2005 en Lloret de Mar, Girona (CCB, 2005), puso de manifiesto la existencia de este tipo de redes en la Mancomunidad del Sureste de Gran Canaria para aguas de riego, así como los planes para implantarlas en la Costa del Sol Occidental para el riego de campos de golf. Municipios como Calvià en la isla de Mallorca y de El Prat de Llobregat en la provincia de Barcelona disponen de una red complementaria a la de abastecimiento de agua para consumo humano, mediante la que pueden suministrar agua regenerada para usos urbanos y domésticos de carácter no potable, como riego de jardines y suministro de cisternas de inodoros.

Los criterios básicos que deben guiar la instalación y el mantenimiento de una red secundaria de distribución de agua regenerada (no potable) son: 1) asegurar que no se produce ninguna interconexión, accidental o de otro tipo, entre la red secundaria y la red de abastecimiento de agua potable y 2) asegurar la estanqueidad de la red secundaria. La exigencia de evitar las interconexiones directas entre las conducciones de la red secundaria y la red de abastecimiento de agua potable es uno de los objetivos prioritarios de cualquier municipio en que exista tal duplicidad de redes de distribución de agua.

Los criterios adoptados por la industria del agua en los EEUU para satisfacer estas exigencias han sido: 1) utilizar conducciones de calidad similar a las de la red de abastecimiento, aunque pudiendo adoptar distintos tipos de válvulas en los puntos de uso domiciliario y 2) codificar las conducciones de agua regenerada destinada a usos no potables dotándolas de un color diferenciado, el color rosa o morado, junto con una indicación impresa sobre la propia tubería en la que pueda leerse "agua regenerada". Una codificación como ésta es actualmente común en los conductos de gas (amarillo), de agua potable (azul) o de agua acondicionada para la industria (verde). Además de esta codificación, los servicios municipales de dichos proyectos se ocupan de asegurar que las conexiones de los usuarios a la red de agua potable y la de agua regenerada para riego se realizan adecuadamente, evitando interconexiones accidentales.

La reutilización planificada de 880 hm<sup>3</sup>/año en California (2015) y de 915 hm<sup>3</sup>/año en Florida (2006) y en debida proporción los 6 hm<sup>3</sup>/año reutilizados en la Costa Brava (2009) son muestras elocuentes de los beneficios que el agua regenerada está aportando para el riego agrícola y de jardinería en particular, como elemento de una gestión integrada de los recursos en un contexto de déficit crónico y creciente de recursos.

## REUTILIZACIÓN INDUSTRIAL

El reciclado interno del agua es una práctica frecuente en las instalaciones industriales. El efluente de un proceso puede ser utilizado en otro cuyas exigencias de calidad son menores. De este modo, el agua puede seguir un flujo a contracorriente del seguido por el proceso industrial: el agua de mejor calidad se utiliza para las aplicaciones más exigentes y el efluente con una calidad cada vez menor se puede utilizar para las aplicaciones menos exigentes, como la limpieza de materias primas, vehículos e incluso vías de circulación. Las crecientes exigencias de calidad aplicables a los efluentes industriales, como forma de asegurar la protección ambiental, han llevado a la implantación de procesos de depuración industriales cada vez más intensos y amplios, dando lugar a unos efluentes de calidad suficiente como para poder ser reutilizados de nuevo en ciertas etapas de la propia industria. Los episodios de sequía registrados en zonas semiáridas, especialmente costeras y con suministros insuficientes, han potenciado todavía más el interés por impulsar los procesos de depuración y de reciclado como forma de asegurar la fiabilidad del suministro. Por último, los numerosos incentivos económicos e incluso comerciales y de percepción de los consumidores han suscitado el interés de las empresas por potenciar su imagen corporativa pasando a ser protagonistas destacados en el reciclado de sus aguas de proceso (con acreditaciones reconocidas) y en la reducción de las demandas de agua externas, como forma de respetar el medio ambiente y las poblaciones limítrofes. Cuando estos procesos de reciclado interno no son suficientes o viables para asegurar la totalidad del suministro, las industrias suelen recurrir a fuentes adicionales de suministro, como el agua regenerada producida a partir de efluentes municipales depurados.

Un ejemplo ilustrativo de la capacidad del reciclado industrial, incluso en la industria alimentaria, es el proyecto de preparación y envasado de ensaladas y otros vegetales que utiliza las aguas residuales del propio proceso industrial en la factoría Tilmanstone Salads en el Reino Unido (Veolia, 2013). Una vez que esos efluentes son regenerados hasta un nivel de calidad equiparable al del agua de consumo humano, son mezclados con aguas de abastecimiento público y pasan a ser utilizados como nueva fuente de suministro. El proceso de regeneración incluye tamizado, flotación con aire disuelto, reactor biológico de membranas, ultrafiltración, nano-filtración y desinfección con luz ultravioleta, asegurando así que el agua regenerada cumple con los requisitos del *Drinking Water Inspectorate*. Los beneficios económicos del proyecto son destacables: una huella hídrica de un 25 % de la anterior, una notable reducción del coste del agua de abastecimiento y del canon de saneamiento de las aguas residuales y una mayor disponibilidad de agua para la población, equivalente a la dotación de 5.000 residentes.

Uno de los proyectos más destacados de la estrategia de suministrar agua municipal regenerada para usos industriales es el que viene realizando West Basin Municipal Water District (WBMUD, [www.westbasin.org](http://www.westbasin.org)) en el sur de California. El WBMUD fue fundado en 1947, por acuerdo de 5 ciudades al sur de la ciudad de Los Ángeles, con la intención de proteger los acuíferos costeros sobre-explotados y gestionar la intrusión salina mediante la recarga con agua importada desde el río Colorado. La creciente demanda de agua de unas poblaciones en intenso crecimiento intensificó la adquisición de agua importada desde el norte del Estado, hasta que en 1958 se planteó la conveniencia de construir una estación regeneradora de agua que permitiera ampliar los recursos disponibles para la recarga y el consumo local.

La primera gran sequía de la historia de California ocurrida en 1987-92 hizo que se intensificaran las restricciones y se iniciara la construcción de una ERA que se inauguró en 1995, con dos objetivos principales: 1) el suministro a un campo de golf local y 2) la inyección de agua en una barrera contra la intrusión salina. Esa misma sequía hizo que varias refinerías próximas se plantearan la conveniencia de optar por un suministro de agua regenerada, fiable y de calidad, a un coste similar, o incluso ligeramente superior al del suministro convencional de agua importada, pero libre de las restricciones propias de la sequía. En ese mismo período entraron en funcionamiento tres ERA satélites en otras tantas refinerías próximas, a la que vendría a sumarse una cuarta ERA en otra refinería en 1999, la primera de los EEUU capaz de producir agua regenerada ultra-pura.

En 2005 se celebró el 10º aniversario de la ERA: una instalación capaz de producir 30 hm<sup>3</sup> de agua anual, con una red de distribución de 130 km, 206 usuarios de agua regenerada y unos 25,000 escolares participando en sus visitas educativas. La ERA produce 5 tipos de agua regenerada, desde agua apropiada para riego agrícola sin restricción hasta agua desmineralizada para calderas de vapor de baja y alta presión, pasando por agua para recarga de una barrera contra la intrusión salina y para suministro de torres de refrigeración. El episodio de sequía de 5 años consecutivos registrado desde 2012 a 2017 permitió confirmar el éxito de esta iniciativa, en cuanto que los usuarios urbanos e industriales pudieron disponer de estos recursos hídricos, al margen de las intensas restricciones impuestas en las dotaciones de agua y en los trasvases de agua desde el norte del Estado.

Este mismo concepto de regeneración de agua para uso industrial es el aplicado en la ERA de El Camp de Tarragona (Sanz *et al.*, 2015). El proceso de regeneración (básica y avanzada) de esta ERA ha sido patrocinado por la Agencia Catalana del Agua y permite suministrar agua regenerada al complejo petroquímico de Tarragona desde noviembre de 2012. La estrategia operativa de la ERA avanzada del Camp de Tarragona es producir agua regenerada básica y avanzada en una instalación centralizada. La ERA avanzada tiene una capacidad de 19,000 m<sup>3</sup>/d (Fase I), estando previstas ampliaciones para producir 29,000 m<sup>3</sup>/d (Fase II) y 55,000 m<sup>3</sup>/d (Fase III) en los próximos años. En 2017, la ERA avanzada alcanzó una producción de 4,4 hm<sup>3</sup>/año. Desde 2014 se dispone de una instalación satélite de regeneración para producir agua de gran pureza en los emplazamientos de diversas industrias del polígono petroquímico.

## **REUTILIZACIÓN POTABLE**

El debate técnico sobre el alcance y el futuro de la reutilización planificada, y consecuentemente de los medios técnicos para la regeneración de agua en países con destacadas realizaciones en este campo, se centra en estos momentos entre la conveniencia de impulsar la reutilización potable (directa, RPD o indirecta, RPI) del agua y la precaución de restringir el alcance de la reutilización a los usos no potables que se han venido desarrollando desde hace varias décadas. Este debate técnico, y necesariamente político y social en muchos casos prácticos, está haciendo olvidar con frecuencia una realidad incontestable: el gran éxito alcanzado por la reutilización para usos no potables en numerosos países del mundo y especialmente en Estados con un gran número y diversidad de proyectos como California y Florida y en zonas como la Costa Brava, la ciudad de Vitoria-Gasteiz, el área metropolitana de

Barcelona, el área metropolitana de Madrid, la cuenca hidrográfica del Segura o las Islas Canarias, en las que la reutilización planificada ha progresado de forma muy destacada desde los años 1980.

La creciente necesidad de agua para abastecimiento urbano, especialmente en zonas costeras, junto con la disponibilidad física y administrativa de crecientes caudales de efluentes depurados en zonas urbanas muy próximas a los puntos de uso y la disponibilidad de procesos de tratamiento de agua con capacidad contrastada para eliminar prácticamente la totalidad de contaminantes conocidos y detectables en las aguas de suministro han propiciado la consideración de los efluentes depurados como una materia prima apta para producir agua regenerada de calidad prácticamente equivalente a la mejor agua superficial o subterránea disponible, y con un coste comparable al de las fuentes de agua convencionales. La aplicación de estos procesos de regeneración avanzada, mediante filtración con membranas de desmineralización de agua y de oxidación y desinfección con biocidas de efecto complementario como la luz ultravioleta, el cloro, el agua oxigenada y el ozono, está permitiendo obtener un agua de gran calidad química y sanitaria, superior a la de las mejores aguas superficiales disponibles en esas zonas.

La aplicación más vanguardista de la RPD del agua es la adoptada por la ciudad de Windhoek, Namibia, en 1968, el primer proyecto de este tipo en el mundo y el de mayor capacidad hasta el momento (Lahnsteiner *et al.*, 2004). La ERA avanzada de Goreangab actual tiene una capacidad máxima de 21.000 m<sup>3</sup>/día (7,5 hm<sup>3</sup>/año) y aporta un caudal medio de 18.000 m<sup>3</sup>/día, lo que representa un 26 % del abastecimiento de agua para consumo humano de la ciudad. La sequía registrada en 2016 hizo que se autorizara un aumento de esa limitación hasta un máximo del 40 %. En 1968, el abastecimiento de agua para consumo humano de Windhoek se venía atendiendo con aguas subterránea (35 %) y aguas superficiales del embalse de Von Bach Dam, situado a 65 km de la ciudad. El agua del embalse era tratada mediante un proceso convencional de potabilización antes de su suministro a la ciudad. La escasa fiabilidad de la fuente de aguas superficiales, debido a la irregularidad de las precipitaciones, hizo necesario plantearse la búsqueda de una fuente alternativa de abastecimiento, siendo el agua regenerada la opción más viable. La primera ERA entró en funcionamiento en 1968 e incluía los procesos de floculación, decantación, filtración rápida en arena, carbón activado granular, desinfección con cloro y estabilización.

Esta ERA trataba dos tipos de agua: efluente secundario de la EDAR de Gammans y aguas superficiales del embalse de Goreangab. Inicialmente, entre un 3 % y un 8 % del efluente regenerado se mezclaba con aguas de gran calidad obtenidas de pozos y de la potabilizadora de aguas superficiales, antes del suministro a la ciudad. El progresivo deterioro de la calidad del agua del embalse de Goreangab, debido a la intensa contaminación producida por la escorrentía de asentamientos ilegales alrededor del embalse, llevó a plantearse la necesidad de reducir las aportaciones de agua desde el embalse y compensarlas con el correspondiente aumento de agua regenerada. Ello requirió la rehabilitación y la ampliación de la estación de regeneración de agua. La nueva ERA de Goreangab, completada en 2002, dispone de un sistema avanzado de procesos en multibarrera, al que se han incorporado procesos adicionales de tratamiento: pre-ozonación, ozonación, filtración biológica en carbón activado, filtración mecánica en carbón activado granular y ultrafiltración.



El proyecto Groundwater Replenishment System (GWRS, <http://gwrsystem.com/>) gestionado por el Orange County Water District (OCWD) en el sur California es el proyecto de RPI de agua de mayor capacidad, mejor documentado y más emblemático del mundo en su categoría. El proyecto GWRS empezó a producir agua regenerada de gran calidad en enero de 2008, tras más de 30 años de estudios y demostraciones previas. El proceso de regeneración avanzada se alimenta de un efluente secundario producido a pocos metros por el Orange County Sanitation District (OCSD) y produce un agua regenerada de gran calidad, igual o superior a la de muchas de las aguas superficiales disponibles en el Estado para consumo humano. El proyecto GWRS produce 380.000 m<sup>3</sup>/día desde 2015 y está previsto que alcance su máxima producción de 490.000 m<sup>3</sup>/d tras la ampliación prevista para 2023. El caudal de agua regenerada se incorpora al acuífero del condado mediante su inyección en los 36 pozos de la barrera contra la intrusión marina (35 %) y su infiltración en varias balsas (65 %) situadas a 21 km tierra adentro de la estación de regeneración. El OCWD opera como un proveedor en alta de agua subterránea, mediante la gestión de un acuífero de 70.000 ha que permite abastecer a 2,4 millones de personas en el norte y centro del Condado, a través de 18 compañías municipales y una privada de agua, así como de numerosos usuarios particulares.

El concepto innovador adoptado en el GWRS para la RPI se viene aplicando desde hace años en otros pocos lugares pioneros del mundo, entre los que cabe destacar: 1) el proyecto de recarga de dunas costeras de Wulpen, en Bélgica ([www.iwva.be/docs/torrelee\\_en.pdf](http://www.iwva.be/docs/torrelee_en.pdf)), 2) el proyecto *NeWater* de Singapur ([www.pub.gov.sg/newater/Pages/default.aspx](http://www.pub.gov.sg/newater/Pages/default.aspx)) y 3) el proyecto Western Corridor de Southeast Queensland en Australia ([www.westerncorridor.com.au](http://www.westerncorridor.com.au)). Todos estos proyectos tienen un objetivo común: generar una nueva fuente de agua de abastecimiento público, más fiable frente a la irregularidad meteorológica. Para ello, utilizan procesos de regeneración avanzada casi idénticos: membranas de micro o ultrafiltración, seguidas de membranas de ósmosis inversa y una desinfección final, combinada con una oxidación. Todos estos proyectos hacen uso de una de las dos posibles opciones de “naturalidad”: un acuífero costero en el caso del Orange County y de Wulpen, y un embalse de regulación en el caso de Southeast Queensland y de Singapur.

La ciudad de Hampton Roads, en Virginia, ha puesto en marcha en 2018 el proyecto de demostración SWIFT (Sustainable Water Initiative for Tomorrow, [www.swiftva.com](http://www.swiftva.com)) para la RPI, en el que el agua producida se infiltrará en el acuífero local del río Potomac; la característica significativa del proyecto SWIFT es la incorporación de procesos de carbón activado granular para la adsorción de contaminantes orgánicos, en lugar del proceso de ósmosis inversa generalmente adoptado en otros casos, como el proyecto GWRS.

Durante el año 2018 se han desarrollado diversos proyectos de reutilización potable directa de agua en los EEUU, tanto en fase de demostración como de implantación a escala definitiva, en ciudades como Wichita Falls, Big Spring y El Paso (Texas). El proceso de regeneración avanzada que se está construyendo en El Paso, Texas, permitirá la RPD del agua. Este proyecto es posiblemente el pionero en la RPD del agua en EEUU, en cuanto que el agua producida se incorporará directamente a la red de abastecimiento, sin contar con la amortiguación y el tiempo de reacción que ofrecen los acuíferos o los embalses utilizados en los proyectos de RPI. Esta circunstancia justifica que el proceso de regeneración incluya tanto la utilización de una ósmosis inversa como de una absorción en carbón activado granular, todo

ello con el objetivo de asegurar el mayor grado posible de fiabilidad, robustez y resiliencia para el proceso de regeneración adoptado.

El proyecto de reutilización de agua que se viene desarrollando en Singapur es sin duda el de mayor proyección mediática del mundo, en razón de la magnitud técnica y económica de sus realizaciones y muy especialmente por el apoyo decidido que el gobierno le ha concedido desde que Singapur se independizó de Malasia en 1965. Singapur ocupa 710 km<sup>2</sup>, está poblado por 5,5 millones de habitantes y tiene una demanda de agua de 2 hm<sup>3</sup>/día (360 L/hab.d). Las limitaciones en su capacidad para recoger y almacenar agua, junto con su dependencia de las transferencias temporales de agua desde Malasia, han hecho que Singapur se convierta en el mayor polo de liderazgo internacional sobre la innovación y el desarrollo de la regeneración y la reutilización del agua. La creación de la marca de calidad *NeWater* ha proyectado internacionalmente la imagen de Singapur como un centro tecnológico en donde se recoge el agua residual y se conduce mediante importantes túneles hasta tres importantes estaciones de depuración y regeneración de agua, con un proceso de tratamiento muy similar al adoptado en el proyecto GWRS del OCWD. El agua regenerada de gran calidad, designada como *NeWater* está llamada a satisfacer un 40 % de la demanda y se reutiliza principalmente para el suministro de la industria de telecomunicaciones. Una pequeña parte (estimada entre 3 % y 5 %) se dedica a la RPI, mediante su vertido a embalses de aguas superficiales. La desalación de agua de mar constituye otro de los pilares fundamentales del proyecto innovador de Singapur como forma de generar recursos autóctonos adicionales, fiables y de gran calidad.

El Área Metropolitana de Barcelona dispone de un proyecto de demostración para regenerar agua destinada a la recarga de una barrera contra la intrusión salina en el delta del río Llobregat (Mujeriego *et al.*, 2008). Este proyecto es un complemento de un sistema mucho más amplio (con capacidad de 100 hm<sup>3</sup>/año, 3 m<sup>3</sup>/s) de regeneración básica de agua para el abastecimiento de zonas húmedas, riego agrícola y provisión de caudales adicionales al río Llobregat. El proyecto de demostración de RPI tiene capacidad para producir 15.000 m<sup>3</sup>/día (5 hm<sup>3</sup>/año) con los que alimentar los pozos de una barrera contra la intrusión salina en el acuífero costero del río Llobregat. Los procesos adoptados para la regeneración avanzada del agua son los mismos que los de los proyectos internacionales antes mencionados: ultrafiltración, ósmosis inversa y desinfección con luz ultravioleta.

El municipio de El Port de la Selva, miembro del Consorci de la Costa Brava, ha evaluado durante los años 2016 y 2017 la recarga de su acuífero potable con agua regenerada, como participación en el proyecto de investigación europeo Demoware ([www.demoware.eu](http://www.demoware.eu)), dedicado a la demostración de la reutilización no potable y la RPI del agua. El proyecto de recarga del acuífero de El Port de la Selva tiene por objetivo demostrar la viabilidad técnica y sanitaria de la RPI del agua, como forma de solventar los problemas de abastecimiento de esta localidad en períodos de sequía; estos problemas se derivan tanto de la falta de garantía de abastecimiento como del deterioro de la calidad del agua en su fuente de provisión para el consumo humano, causado por la intrusión marina.

Las sequías experimentadas en Cataluña durante la década de 2010, con precipitaciones inferiores a 350 mm/año, plantearon serios problemas para proporcionar los 300.000 m<sup>3</sup> de agua anuales que requiere El Port de la Selva, alejado de fuentes superficiales de agua y de

redes regionales de distribución de esas aguas. El proyecto evaluado consiste en someter el efluente biológico municipal a una regeneración avanzada, sin procesos de ósmosis, impulsarlo aguas arriba de la riera bajo la que se sitúa el acuífero utilizado para captación de agua de consumo humano e infiltrarlo en dicho acuífero mediante unas balsas proyectadas al efecto. El proceso de recarga se realiza durante los meses de otoño, invierno y primavera, como forma de asegurar que los efluentes han sido depurados de forma efectiva y carecen de aportaciones salinas causadas por posibles intrusiones de agua de mar, tanto superficiales como subterráneas. La capacidad actual del proyecto de recarga es de 600 m<sup>3</sup>/día (90.000 m<sup>3</sup>/año), equivalente a la mitad del efluente depurado producido anualmente. Desde el inicio de 2018, el proyecto aguarda un acuerdo operativo entre las autoridades responsables de los recursos hídricos, la salud pública, la gestión de recursos en la región y el municipio.

Hay que resaltar que todas estas infraestructuras de regeneración avanzada ofrecen un banco de pruebas inigualable en el que poder implantar un ambicioso programa de seguimiento e investigación de su capacidad técnica para responder a las inquietudes sanitarias, ambientales y sociales que puedan plantear las autoridades sanitarias y el público en general (Mujeriego, 2009). Los resultados de un programa como ese permitirían, junto con campañas de información, divulgación y participación del público y de todos los agentes sociales, consolidar un referente sólido sobre el que plantearse el desarrollo de la RPI en las zonas costeras de la Costa Brava y el área metropolitana de Barcelona, a la vez que generar un escaparate de competencia científica y técnica internacional en un campo de tanta relevancia como la gestión de los recursos hídricos.

Conviene resaltar que los retos de la RPI del agua son, sin duda, muy diferentes y adicionales a los que ha ofrecido la reutilización no potable hasta el momento y hacen referencia a la aceptación legal y social de las alternativas, mediante formas novedosas de elaborar normas de calidad, y formas de comunicación, de información y de participación, que permitan adoptar nuevas formas de gestión de los recursos hídricos, más diversas y más ágiles que las utilizadas en el pasado. El gran reto de estos proyectos ha sido y sigue siendo su aceptación por parte de las administraciones y del público. Los excelentes procesos de información y de demostración adoptados en OCWD han permitido obtener la aprobación y el impulso de la población, ante una iniciativa que objetivamente supera las mejoras de calidad del agua que se consiguen exclusivamente con los procesos de depuración y dilución en los medios hídricos naturales.

Las tres estrategias fundamentales adoptadas para impulsar la RPI son: 1) la información y la participación del público, mediante procesos bien organizados, sistemáticos y prolongados, 2) la utilización del medio ambiente natural como un ingrediente imprescindible del proceso de reutilización del agua regenerada y 3) la estrecha colaboración entre administraciones, entidades operadoras y usuarios del agua, como forma de avanzar en la elaboración e implantación de normativas de calidad aplicables a estos nuevos usos del agua regenerada.

La implantación progresiva de las instalaciones, mediante proyectos de demostración en los que el público pueda consultar y comprobar los logros sistemáticos y contrastados de las soluciones propuestas, ha sido un elemento argumental definitivo en muchos casos. La consideración del medio natural (lago, embalse, acuífero) como forma de incorporar el agua regenerada al ciclo natural de los recursos, es un elemento determinante de la aceptación

reglamentaria y pública de los proyectos de reutilización potable indirecta. El agua regenerada se retorna al medio natural (confiriéndole así “un toque de naturalidad”, o utilizando un “tampón medioambiental” según la terminología inglesa), para que permanezca un cierto tiempo de forma controlada y manteniendo sus niveles de calidad iniciales, antes de ser captada y enviada a una planta de potabilización de agua, donde se le somete a un proceso idéntico al que se aplica comúnmente a las aguas subterráneas de fuentes convencionales.

En general, las plantas de regeneración de agua que utilizan efluentes depurados municipales y cuyo producto está destinado a usos municipales (riego agrícola y de jardinería) e incluso industrial (refrigeración) suelen ser explotadas por los propios municipios, bien directamente o bien a través de una empresa de servicios. Estas plantas de regeneración guardan un gran parecido con las plantas potabilizadoras de agua, en cuanto que todo el personal está mentalizado sobre la necesidad de producir un agua de calidad satisfactoria y de aplicar medidas correctoras urgentes, ante cualquier alteración del proceso, para evitar que un agua de calidad insuficiente pueda salir de la ERA. Generalmente, los municipios son los encargados de la distribución y la gestión del agua regenerada, directamente o mediante delegación a una compañía pública o privada, constituyendo así un nuevo servicio público de calidad, una especie de servicio de abastecimiento de una “segunda marca” de agua, con la calidad adecuada para el aprovechamiento previsto, que puede incluir el de RPI. La coordinación y la comunicación con los usuarios, tanto individuales como colectivos (comunidades de regantes, urbanizaciones, campos de golf, usuarios urbanos), son muy directas y cordiales, a fin de detectar cualquier posible incidente y de disipar cualquier duda que pueda surgir.

Por otra parte, la gestión diferenciada entre la entidad responsable de la depuración de las aguas residuales y la entidad responsable de la regeneración del agua ha proporcionado una solución bien aceptada y muy favorable tanto en el proyecto de GRWS operado por el OCWD como en el proyecto de reutilización de agua de Vitoria-Gasteiz (Del Río *et al.*, 1996; comunicación personal, 2005). Esta opción es la más frecuentemente utilizada en los EEUU debido a que la gestión del agua de abastecimiento la suele realizar una entidad pública (Water District) diferente de la entidad dedicada a la gestión del saneamiento y la depuración (Sanitation District). Estas entidades pueden coordinarse ocasionalmente, como forma de compartir beneficios económicos, ambientales o de otros tipos, creando una nueva entidad dedicada específicamente a la regeneración y la reutilización del agua, como ocurre en el caso del proyecto GWRS, resultado de la colaboración entre el OCWD y el OCSD.

La trayectoria seguida por estos proyectos emblemáticos permite identificar los elementos esenciales de su desarrollo y aprobación: mientras que el proyecto de Wulpen en Bélgica ha tenido una limitada proyección en los medios de comunicación, posiblemente debido a su limitada dimensión (7.000 m<sup>3</sup>/día de agua regenerada, que representa un 45 % del agua infiltrada en las dunas naturales) y a la participación activa de grupos ambientalistas para promover la incorporación en el proyecto de zonas naturales con acceso del público, el proyecto de Singapur goza de una intensa proyección mediática y técnica internacional, que ha conseguido popularizar a escala mundial la propuesta de RPI, cuando en realidad parece que sólo de un 3 % a un 5 % del agua regenerada se incorpora en los embalses, siendo el resto dedicada a usos industriales y urbanos. Por otra parte, el proyecto Western Corridor de Australia ha registrado un notable rechazo por una parte de la población, que expresa su temor

ante la exposición a contaminantes peligrosos y su rechazo a una decisión que previamente había sido denegada mediante referéndum. El GWRS es realmente el único proyecto de tamaño considerable (130 hm<sup>3</sup>/año, 2015) que ha sabido obtener la aceptación incontestable de la población, en un territorio donde otras propuestas similares han fracasado hasta el momento, mediante un programa sistemático de demostración, de información y de participación del público. El proyecto fue ampliado en 2015 para dotarlo de una capacidad adicional de 40 hm<sup>3</sup>/año, sobre los 90 hm<sup>3</sup>/año iniciales, con un coste de 143 millones de dólares.

En este contexto de liderazgo internacional en nuevas formas de gestión de los recursos hídricos y ante la escasa fiabilidad de los recursos utilizados para el abastecimiento del Área Metropolitana de Barcelona (490 hm<sup>3</sup>/año), como quedó patente durante los últimos meses del reciente episodio de sequía (mayo de 2008), parece razonable plantearse la opción de iniciar una nueva fase, cuando menos exploratoria, sobre el potencial que la reutilización potable indirecta tiene para aportar recursos nuevos y fiables en el Área Metropolitana de Barcelona. El carácter exploratorio vendría justificado por el tiempo necesario para desarrollar estos conceptos y sobre todo para presentarlos ante la población y las autoridades sanitarias, de modo que pudieran implantarse, si fueran aceptados, antes de los nuevos episodios de sequía que las previsiones climatológicas anticipan para las próximas décadas (Mujeriego, 2008).

Los efluentes secundarios de las estaciones depuradoras de El Prat de Llobregat (100 hm<sup>3</sup>/año) y de Besòs (160 hm<sup>3</sup>/año) ofrecen una materia prima con la que obtener unos 210 hm<sup>3</sup>/anuales de agua regenerada de gran calidad (mediante membranas de ósmosis inversa y desinfección con luz ultravioleta unida a una oxidación avanzada) que podría incorporarse a las masas de agua superficiales y subterráneas del Área Metropolitana, formando así parte de sus futuras fuentes de suministro y liberando caudales de las fuentes desde donde ahora se importa agua. Un proyecto como éste contribuiría considerablemente a mejorar la garantía de suministro en el área abastecida por la empresa pública Aigües Ter-Llobregat, y colocaría a Barcelona, a Catalunya y a España a la vanguardia de las nuevas formas de gestión de los recursos hídricos, más acordes con las sequías climatológicas que se anticipan y mucho más respetuosa con el medio ambiente y los usuarios de la cuenca fluvial del río Ter desde donde se capta agua en estos momentos. El GWRS es sin duda la referencia más emblemática, tanto técnica como sociológicamente, que se podría utilizar para impulsar en Catalunya una iniciativa vanguardista para la gestión del agua.

## **REUTILIZACIÓN EN ZONAS COSTERAS**

El desarrollo urbano, turístico y agrícola actual, especialmente en las zonas costeras españolas, conlleva un importante consumo de agua, tanto para satisfacer los correspondientes usos domésticos como para atender las demandas de una creciente extensión de zonas ajardinadas y agrícolas que sirven de marco lúdico y comercial. La gestión de los recursos hídricos en esas condiciones se plantea con dos objetivos complementarios: 1) la utilización racional del agua, evitando los consumos excesivos y 2) la reutilización del agua para usos no potables, especialmente la jardinería, la agricultura y la mejora ambiental, permitiendo así la creación neta de nuevas dotaciones de agua y evitando el deterioro de las aguas costeras. Entre las actuaciones más acordes con cada uno de esos objetivos cabe citar, de una parte, la educación

y la información ciudadana, la reglamentación y las tarifas progresivas y, de otra parte, la regeneración y la reutilización planificada del agua.

Las zonas costeras españolas se caracterizan por el relativo paralelismo entre las mayores producciones de agua depurada que se registran durante la temporada estival y la máxima demanda de agua para riego agrícola y de jardinería que se produce durante esa misma estación. Al margen de las exigencias técnicas y financieras que esas demandas estacionales de agua plantean, tanto en el sistema de abastecimiento como en el de depuración y vertido de los efluentes tratados, la reutilización planificada del agua en zonas costeras ofrece claras ventajas económicas y ambientales en sus diversas alternativas: 1) riego de jardinería, con lo que conlleva de mejora de las condiciones de vida, del aspecto estético y del carácter lúdico de la zona, 2) riego agrícola, como fuente de recursos económicos de gran importancia estratégica y 3) recarga de acuíferos costeros y de zonas húmedas, como forma de proteger unos recursos naturales de gran atractivo y valor ambiental, que son también reservas estratégicas de agua.

Una instalación de regeneración de agua para riego agrícola y de jardinería en las zonas turísticas españolas se ha convertido en un estandarte tecnológico y de prestigio de primera magnitud en todo el sur de Europa y la región mediterránea, confiriéndole una posición de vanguardia en esta faceta de la gestión de los recursos hídricos.

## **COSTE DE LA REUTILIZACIÓN PLANIFICADA EN ESPAÑA**

La entrada en funcionamiento de diversos proyectos de reutilización para riego de jardinería y agrícola en la Costa Brava, promovidas por el Consorcio de la Costa Brava desde 1985, y de la ERA de Vitoria-Gasteiz en 1994, promovida por la Comunidad de Regantes Arrato y financiada por la Diputación Foral de Álava, marcaron una primera década del proceso de implantación de la reutilización planificada en España. El logro principal de esa etapa fue documentar la capacidad personal y tecnológica de nuestras instalaciones para obtener un agua regenerada de calidad comparable a la de otros países pioneros, y de utilizarla de forma eficiente para el riego de jardinería y de cultivos de consumo directo e industriales.

La terminación en el año 2004 del primer embalse regulador de aguas regeneradas, como parte del mismo proyecto de gestión integral del agua de Vitoria-Gasteiz, y la expansión de diversos proyectos de reutilización en la Costa Brava y otras zonas españolas marcaron una segunda década de este proceso de desarrollo de la reutilización planificada. El logro más destacado de esta segunda fase fue documentar el coste real de la regeneración y la reutilización del agua a un nivel de calidad y de gestión integrada comparable al de los países líderes en este campo.

Los datos facilitados por los responsables de la explotación de la ERA de Vitoria-Gasteiz (Julio López, comunicación personal, 2006) confirman los valores de referencia iniciales para el coste del agua regenerada en España en 0,06 euros/m<sup>3</sup>. Este valor era similar al aplicado en diversas comunidades autónomas, como los incluidos en los presupuestos de la Entitat de Sanejament d'Aigües de la Generalidad Valenciana (EPSAR, 2005). Como ejemplo de tarifas aplicables al agua regenerada para riego agrícola y de jardinería, a la salida de la ERA correspondiente, cabe citar las publicadas por el Consorci de la Costa Brava (BOP, noviembre

2013) según las cuales, los cultivos intensivos que usen hasta 30.000 m<sup>3</sup>/año tenían una cuota fija de 40 €/mes y una cuota variable de 0,10 €/m<sup>3</sup>, mientras que las comunidades de regantes, con usos superiores a 30.000 m<sup>3</sup>/año, tenían una cuota fija de 80 €/mes y una cuota variable de 0,015 €/m<sup>3</sup>. La Confederación Hidrográfica del Júcar (2016) tenía establecido un coste del agua regenerada para riego agrícola de 0,034 €/m<sup>3</sup>, que puede reducirse a 0,027 €/m<sup>3</sup> si se considera el canon de vertido que se ahorra por no verter el agua depurada a cauce público. A título informativo, el canon de regulación del río Turia en 2016 era de 0,0014 €/m<sup>3</sup>.

El plan de reutilización integral de Vitoria-Gasteiz, financiado por la Diputación Foral de Álava (Mujeriego y López, 2008), ofrece un marco de referencia ideal para evaluar las implicaciones económicas que la reutilización planificada del agua comporta:

1. Una inversión de 3,25 millones de euros para construir la estación de regeneración básica de agua, con una capacidad de 35.000 m<sup>3</sup>/día (400 l/s; 12,5 hm<sup>3</sup>/año).
2. Unos costes anuales de explotación y mantenimiento de la estación de regeneración cifrada en 0,4 millones de euros, para producir 12,5 hm<sup>3</sup> anuales de agua regenerada con calidad adecuada para riego sin restricciones.
3. Una inversión de 28 millones de euros para sufragar la construcción de una red de riego de nueva planta con la que distribuir el agua en 10.000 ha, incluyendo los bombeos y un embalse regulador de 7 hm<sup>3</sup> en el que almacenar agua regenerada durante el invierno para poder regar durante el verano. La construcción del embalse regulador representó una inversión equivalente a 1,7 euros/m<sup>3</sup> (Mujeriego y López, 2006).

Como ilustran estas cifras, las mayores exigencias económicas están asociadas a la reutilización del agua (distribución al usuario), mientras que el coste de la estación de regeneración y sobre todo los costes de explotación y mantenimiento (la regeneración del agua) son comparativamente mucho menores. Esta reflexión permite anticipar que las mejoras en la calidad del agua regenerada, hasta alcanzar unos niveles que permitan el riego sin restricción, son de escasa significación relativa cuando se plantea un proyecto de reutilización planificada con una cierta visión de futuro, en consonancia con los niveles de protección ambiental y de salud pública propios de una sociedad como del siglo XXI en España.

Conviene resaltar que la mayoría de los proyectos de reutilización planificada del agua que se implantaron en el territorio peninsular, especialmente con anterioridad a la aprobación de RD 1620/2007, fueron promovidos por los propios usuarios, motivados por la necesidad coyuntural de agua. Muchos de esos proyectos fueron realizados en ausencia de un marco regulador que definiera la titularidad del recurso, el régimen económico y financiero (ayudas y cánones), las responsabilidades contractuales, la fiabilidad del proceso y la calidad del agua exigible para cada aprovechamiento, en razón de la ausencia de criterios oficiales de calidad y de requisitos de uso. No obstante, la precaución y la responsabilidad de los promotores junto con el apoyo técnico de las entidades responsables de la tutela del recurso permitieron implantar unos sistemas de regeneración y reutilización de gran calidad y fiabilidad, que han servido para desarrollar un saber hacer autóctono y propiciar estudios específicos sobre la eficacia y la fiabilidad de los procesos, especialmente relativos a la desinfección del agua regenerada, utilizando diversos desinfectantes e indicadores de calidad sanitaria tanto de tipo bacteriano como de tipo vírico (CCB, [www.ccbgi.org](http://www.ccbgi.org)).

Al margen del éxito alcanzado, el factor limitante de la expansión de estos proyectos ha sido precisamente la ausencia de un marco de gestión integrada, que permita considerar conjuntamente los costes del proceso y los beneficios directos e indirectos (externalidades) que comportan. No hay duda de que muchos de estos proyectos han alcanzado una aceptación muy positiva entre los usuarios y una percepción pública muy favorable, especialmente para el riego de jardinería, de campos de golf y de protección ambiental. Es evidente que el objetivo a conseguir en la tercera década que se inició en 2005 había de ser conseguir que la reutilización planificada se convirtiera realmente en un elemento más de la gestión integrada de los recursos hídricos, mediante acuerdos entre usuarios urbanos, agrícolas y de ocio.

Los estudios económicos realizados por el Área Metropolitana de Barcelona (AMB, 2011) para la reutilización básica (agua de calidad apta para riego sin restricciones) indicaban una inversión específica de  $0,25 \text{ €/m}^3$  de capacidad anual y un coste de explotación y mantenimiento de  $0,032 \text{ €/m}^3$  de agua regenerada producida. El coste de explotación y mantenimiento para la desmineralización del agua regenerada básica, mediante electrodiálisis reversible (riego agrícola), ascendía a  $0,13 \text{ €/m}^3$  mientras que mediante ultrafiltración y ósmosis inversa (para inyección en barrera contra la intrusión salina) ascendía a  $0,20 \text{ €/m}^3$ . La abundancia de recursos hídricos en muchas de nuestras cuencas hidrográficas desde el año 2008, último de la sequía más reciente, junto con la austeridad presupuestaria aplicada a las inversiones públicas, han llevado a muchos de nuestros proyectos de reutilización de agua a permanecer en estados próximos a la hibernación hasta bien entrado 2016.

La Tabla 1 resume los costes de inversión y de consumo energético que conllevan actualmente la regeneración de agua, la regulación en embalses en derivación y la desalación de agua salobre y marina. Los valores indicados para la regeneración de agua corresponden a unos niveles de calidad adecuados para su utilización en riego agrícola y de jardinería, con calidad suficiente para asegurar unos niveles de protección ambiental y de salud pública comparables a los asociados con el uso de agua potable y capaces por tanto de ser utilizada sin restricción respecto al posible contacto del agua con el público y los cultivos. Los valores indicados para la desmineralización de aguas salobres se corresponden razonablemente bien con los costes asociados a la regeneración avanzada del agua para su reutilización potable indirecta.

La Tabla 1 muestra el incremento de los costes de inversión a medida que se pasa de la regeneración a la regulación y a la desmineralización. Si a ello se añade el período de amortización, resulta claro que los costes unitarios de la regulación son los menores de todos ellos, seguidos por los de la regeneración y los de la desalación. Obviamente, la valoración completa de la reutilización requiere tener en cuenta los costes de inversión de la red de distribución que pueda ser necesaria. En definitiva, los costes reales, tanto de construcción como de explotación y mantenimiento de estos proyectos, son muy dependientes de las condiciones concretas que afectan al lugar geográfico y al momento considerado.

El consumo energético de estas tres alternativas marca igualmente una clara distinción entre ellas. Mientras que la regeneración básica tiene unos consumos unitarios inferiores a  $1 \text{ kWh/m}^3$ , la desmineralización de agua salobre alcanza normalmente valores ligeramente superiores a  $1 \text{ kWh/m}^3$ , la regeneración avanzada se aproxima a  $1,5 \text{ kWh/m}^3$  y la desmineralización de agua de mar se sitúa en  $4 \text{ kWh/m}^3$ . Al margen de estos costes, conviene



tener en cuenta también el impacto ambiental que esos consumos eléctricos comporta. Considerando que la aportación media de dióxido de carbono se sitúa en torno a 460 g por cada kWh producido en España y que el derecho de emisión de dióxido de carbono se sitúa aproximadamente en 20 euros por tonelada, cada kWh consumido en España añade un coste ambiental adicional de hasta 0,01 €/m<sup>3</sup> al agua regenerada (básica y avanzada) y de 0,04 €/m<sup>3</sup> al agua marina desalada.

Tabla 1. Costes de inversión y energéticos de diversas alternativas de gestión, Consorcio Costa Brava, Vitoria, ATLL, Palma de Mallorca, C. Taibilla, Málaga, Bélgica, Camp de Tarragona, California.

Alternativa	Inversión, Euros.año/m <sup>3</sup>	Amortización, años	Energía, kWh/m <sup>3</sup>
Regeneración (riego sin restricción)	0,26 (Vitoria, 1995)	15-25	0,001-0,73 (Sala y Serra, 2004)
Regulación (en derivación)	1,7 (Vitoria, 2004)	> 100	----
(en acuífero)	2,0 \$ (Calif., 2000) 0,86 \$ (Calif., 2005)	> 100 25	
Trasvase Ródano (ATLL, 1999) (Estimación 2010)	2,8 (900 M€ 325 hm <sup>3</sup> ) 3,9 (1270 M€ 325 hm <sup>3</sup> )	50	1,7-2,0
Desalación salobre	0,9 (Málaga, 2005-06)	5 (membranas) 15-20 (obras y equipos)	0,8
Regeneración potable	2,4 (Bélgica)		----
Regeneración potable	3,4 \$ (2,6 €) (OCWD, 2008)		1,5
Regeneración avanzada	Camp de Tarragona (2015)		0,5
Desmineralización	Camp de Tarragona (2015)		1,2
Desalación agua de mar (Blanes, Barcelona, Mallorca, Taibilla)	3,0 – 4,0	5 (membranas)	3,5 - 4,0

## LA SEQUÍA PLURIANUAL DE CALIFORNIA

El episodio de sequía que afectó a California durante cinco años consecutivos (septiembre 2012-octubre 2017) planteó unos retos de magnitud sin precedentes en la gestión de los recursos hídricos del Estado y en particular sobre el papel que el ahorro de agua, la regulación del agua y la regeneración y la reutilización del agua pueden jugar en su resolución. Los párrafos siguientes resumen algunas de las iniciativas que se han adoptado y se están considerando para afrontar el reto de esta intensa sequía plurianual.

El artículo de los profesores Jay Lund y Ellen Hanak, del Centro de Ciencias Hidrográficas de la Universidad de California en Davis (<http://californiawaterblog.com/>), presenta 10 cambios previsibles en la gestión de los recursos hídricos del Estado. Los autores manifiestan que las políticas hídricas de California han consistido realmente en propiciar y en resistir a los cambios. La explotación minera del oro, el desarrollo de la agricultura y las ciudades y las prioridades ambientales actuales han propiciado cambios fundamentales en la gestión, las leyes y la normativa sobre el agua y el suelo. Todos esos cambios fueron motivados por la degradación ambiental y la evolución de la estructura económica y las prioridades sociales de

California. Los cambios han sido generalmente lentos y con frecuencia controvertidos. Nuevos cambios han aparecido en el horizonte, motivados por grandes y prolongados procesos físicos como la elevación del nivel del mar, el calentamiento global, la subsidencia, el agotamiento de las aguas subterráneas y la acumulación de sales y nitratos en las aguas subterráneas. La política y la gestión hídricas de California habrán de prepararse para esas aparentes condiciones inevitables y encontrar soluciones que permitan mantener una economía fuerte y un medio ambiente saludable, facilitando las transiciones para los grupos vulnerables.

En esas circunstancias, el gobernador del estado de California, Edmund G. Brown Jr., declaró el 17 de enero de 2014 el estado de emergencia hídrica en todo el estado (<http://gov.ca.gov/news.php?id=18368>) y ordenó a todos los responsables estatales a adoptar todas las medidas que pudieran ser necesarias para prepararse ante estas condiciones de sequía. El estado se enfrentaba a restricciones de agua en el año hidrológico más seco de su historia. “No podemos hacer que llueva, pero si podemos prepararnos para afrontar mejor las terribles consecuencias con que nos amenaza la sequía en California, incluyendo la dramática reducción de agua para nuestros campos y poblaciones y los mayores riegos de incendio en zonas urbanas y rurales”. “He declarado este estado de emergencia y pido a todos los californianos que ahorren agua en cualquiera de las maneras que les sea posible”. En su declaración de emergencia, el gobernador Brown instaba a los responsables estatales a que ayudasen a los agricultores y ciudadanos que pudieran verse perjudicados económicamente por la sequía, asegurando así que el estado pueda tener capacidad de respuesta cuando los californianos deban afrontar restricciones de agua de consumo público. El gobernador también instó a los organismos estatales a que usasen menos agua y contratasen más bomberos, y lanzó una extensa campaña de sensibilización pública destinada a promover el ahorro de agua. La declaración del estado de emergencia fue la continuación de una serie de acciones adoptadas por la administración para asegurar que California estaba preparada ante las condiciones excepcionales de sequía que se estaban registrando.

Para valorar el impacto que la extracción de aguas subterráneas estaba teniendo en el estado de California, el Servicio Geológico de los Estados Unidos, en colaboración con otras agencias, publicó un informe sobre la subsidencia en las zonas del norte del Valle de San Joaquín durante el periodo 2003-10 (<http://pubs.usgs.gov/sir/2013/5142/>). Las grandes extracciones de agua subterránea de los depósitos sin consolidar del Valle de San Joaquín habían propiciado una extensa compactación del acuífero con la consiguiente subsidencia del suelo, que alcanzó hasta 8,5 metros entre 1926 y 1970. La traída de aguas superficiales iniciada en los años 1950 a través del Canal Delta-Mendota y a partir de los años 1970 mediante el California Aqueduct dieron lugar a una disminución de los bombeos, la recuperación de los niveles piezométricos y un menor grado de compactación en algunas zonas del Valle del San Joaquín. No obstante, las sequías experimentadas durante los años 1976-77 y 1987-92, junto con la sequía y las restricciones en las asignaciones de agua superficial durante los años 2007-10, redujeron la disponibilidad de aguas superficiales, propiciando un aumento de los bombeos, un descenso de los niveles piezométricos y la reanudación de la compactación. La subsidencia causada por esta compactación ha rebajado la lámina de agua y la capacidad de flujo del Canal Delta-Mendota, el California Aqueduct y otros canales que suministran agua de riego y evacúan aguas de escorrentía. A pesar de que la porción norte del Canal Delta-Mendota registró una estabilidad relativa, con una deformación principalmente elástica, la deformación en las zonas

del sur del Canal llegó a alcanzar 540 mm cerca del río San Joaquín durante los años 2008-10, dentro de una zona de 3.200 km<sup>2</sup> afectada por una subsidencia de al menos 20 mm durante ese mismo período.

Con objeto de ofrecer formas de gestión más sostenibles de los recursos, el Centro de Ciencias Hidrológicas de la Universidad de California en Davis publicó un artículo titulado “La primera lección de la sequía: modernizar la gestión del agua”, (<http://californiawaterblog.com/2014/04/09/droughts-no-1-lesson-modernize-water-management/>) en la que señala que la sequía estaba poniendo a prueba la forma en que California gestiona sus recursos hídricos durante periodos de sequía intensa. Los problemas asociados con la reciente sequía, la más grave de los últimos 30 años, muestran las oportunidades disponibles para mejorar la forma en que se gestiona este fenómeno recurrente de su clima. En conjunto, California necesita modernizar sus políticas y formas de gestión de la sequía en al menos cuatro facetas: sistemas de mediciones estatales, ecosistemas, aguas subterráneas y precios. Muchos de los cambios sugeridos podrían implantarse con la actual legislación, complementada con pequeños recursos adicionales. El estado dispone en estos momentos de autoridad para implantar mejoras en las mediciones, la previsión y la planificación de las sequías, incluyendo el uso de caudales ambientales para la protección piscícola durante las sequías. California necesita modernizar su preparación ante la sequía. El momento de iniciar esa modernización no es cuando la sequía haya pasado, momento en que las lluvias limpiarán la memoria, sino durante el período de sequía, que es cuando la motivación política y la atención del público alcanzan sus mayores niveles.

El 25 de abril de 2014, el gobernador de California publicó un nuevo decreto (<http://gov.ca.gov/news.php?id=18496>) declarando la persistencia del estado de emergencia debido a las severas condiciones de sequía en que se encontraba el estado. El artículo 10 del decreto ordena al Consejo Estatal del Agua que adopte los requisitos de vertido de efluentes depurados de aplicación estatal que faciliten el uso de efluentes depurados que, satisfaciendo las normas establecidas por el Departamento de Salud Pública, permitan reducir las demandas de suministro de agua potable. El artículo 19 del decreto establece la suspensión del requisito de realizar una auditoría ambiental en esos casos, tal como establece la ley de Calidad Ambiental de California, con objeto de que el Consejo Estatal del Agua pueda adoptar este decreto tan pronto como sea posible. Esos requisitos de vertido para la posterior reutilización del agua serán únicamente aplicables a los efluentes depurados para usos no potables. La reutilización del agua es un elemento esencial del programa general de gestión de los recursos hídricos locales y regionales. El Departamento de Salud Pública dispone de criterios de calidad para el agua regenerada, contenidos en el capítulo 22 de la Ley del Agua de California (conocidos como los criterios del capítulo 22). Los usos del agua regenerada considerados en ese decreto hacen referencia a efluentes depurados que pueden ser utilizados para riego agrícola, jardinería urbana y otros usos no potables. Entre las actividades no autorizadas por el decreto figuran la recarga de acuíferos, el vertido en lagunas de percolación y la reutilización para abastecimiento humano o de animales.

Esa intensa sequía ha tenido unas consecuencias muy importantes sobre la agricultura de regadío, como anticipaban los modelos predictivos del Centro de Estudios Hidrológicos de la Universidad de California en Davis (<http://californiawaterblog.com/2014/05/19/severe->

[drought-impacts-to-central-valley-agriculture-forecast-this-year/](#)). Las previsiones eran que la sequía reduciría las dotaciones de agua de los regantes del Central Valley en unos 8.000 hm<sup>3</sup> de aguas superficiales durante la estación de cultivo, con respecto a sus dotaciones normales. Para compensar esas reducciones, los agricultores debieron recurrir a la extracción de aguas subterráneas para compensar unos 6.000 hm<sup>3</sup>, habiendo de prescindir de los 2.000 hm<sup>3</sup> restantes, lo que equivalía a un 7,5% del agua de riego normalmente utilizada en el Central Valley. Ese déficit ha ocasionado muy probablemente el abandono de unas 190.000 ha de cultivos, un 6% de la superficie de regadío. El Centro estimó que esos ajustes ocasionarían unas pérdidas en las cosechas de 740 millones de dólares, un 3% de los ingresos en años de precipitaciones normales, además de unos 450 millones de dólares adicionales debidos al coste de los bombeos. El coste total de la sequía durante el año 2014 para los agricultores del Central Valley se estimó en 1,2 millardos de dólares (4,8 % respecto a los ingresos en condiciones de lluvia normal) y las pérdidas económicas para la región pudieron alcanzar 1,7 millardos de dólares. Los puestos de trabajo perdidos en el campo se estimaron en unos 6.400 (4,2 % de la fuerza laboral normal) que sumados a las pérdidas en puestos de trabajo indirectos pudieron afectar a 14.500 personas.

El problema con la utilización de aguas subterráneas en California es que muchos de sus acuíferos han alcanzado sus niveles históricos más bajos y algunos de ellos se enfrentan a posibles restricciones, según un reciente informe del Departamento de Recursos Hídricos, elaborado en respuesta a la declaración de sequía realizada por el gobernador Brown en enero de 2014. A pesar de los grandes perjuicios ocasionados a los agricultores, las poblaciones asociadas y el medio ambiente, el Centro considera que el conjunto de la economía del estado no habría de sentirse amenazada, ya que la agricultura representa menos del 3 % del PIB del estado que era de 1,9 billones de dólares.

Para reconducir la gestión descoordinada que se ha venido aplicando a las aguas subterráneas en California y hacer que ésta pueda ser en muy breve plazo el último Estado del oeste en regular la extracción de aguas subterráneas, su cámara legislativa se planteó una estrategia sin precedentes sobre la gestión de los acuíferos. Tras largos debates, el congreso californiano aprobó a finales de agosto de 2014 un paquete de tres leyes que otorga al gobierno estatal la tarea de supervisar la extracción de estas aguas. La legislación, firmada por el Gobernador (<http://gov.ca.gov/news.php?id=18701>) el 16 de septiembre de 2014 exigirá a los gestores de acuíferos de ciertas zonas a redactar planes de protección frente a su sobre-explotación. El Estado podrá revisar esos planes y se reserva la potestad de intervenir en caso de que esos planes no lleguen a prepararse o a implantarse. Actualmente, California puede regular los recursos extraídos desde cauces y embalses, pero carece de autoridad para supervisar a nivel estatal la extracción de aguas subterráneas. Los propietarios del terreno tienen generalmente el derecho de extraer el agua existente bajo la superficie de sus parcelas. A medida que la disponibilidad de aguas superficiales ha disminuido a causa de la intensa sequía, los agricultores y otros usuarios han recurrido a los pozos como fuente de recursos. Se estimó que un 65 % de los recursos utilizados en California durante el año hidrológico de 2014 procedería de los acuíferos, frente al 40 % utilizado en años normales. Congresistas demócratas y republicanos del Central Valley, cuyos votantes forman esa floreciente zona agrícola del Estado, se opusieron a la nueva legislación. Mientras que los demócratas reclamaban un nivel de apoyo (económico y financiero) similar al concedido a otras recientes propuestas

legislativas, los republicanos manifestaban su rechazo a unas leyes deficientemente elaboradas que darán un mayor control al Estado y que podrían tener efectos devastadores sobre los propietarios de las fincas y sus trabajadores, los negocios, las familias y las poblaciones del Central Valley.

Los votantes de California tuvieron la posibilidad de valorar una propuesta de financiación estatal, por valor de 7,12 millardos de dólares, que fue sometida a referéndum el mes de noviembre de 2014. Bajo el título “Ley para la mejora de la calidad y el suministro de agua y de las infraestructuras hídricas” ([http://gov.ca.gov/docs/Water\\_Bond\\_Outline\\_8\\_13\\_14.pdf](http://gov.ca.gov/docs/Water_Bond_Outline_8_13_14.pdf)) esta propuesta de endeudamiento público, aprobada por el gobernador Edmund G. Brown Jr. el 13 de agosto de 2014, apareció como Propuesta no. 1 en el boletín de voto. La Propuesta no. 1, que fue aprobada por referéndum popular, asignaba 725 millones de dólares para proyectos de reutilización de agua en todo el Estado y 810 millones de dólares para la gestión integrada regional de los recursos hídricos, con los que se pudieran financiar proyectos hídricos, incluyendo los de reutilización de agua. El consejo de gobierno de la sección californiana de la WaterReuse Association ha votó unánimemente a favor de esta propuesta de financiación estatal. En palabras de Mike Markus, presidente de la sección californiana y gerente de Orange County Water District, “el desarrollo de proyectos de reutilización de agua en California es una tarea esencial para conseguir la fiabilidad hídrica. A medida que el estado se enfrenta a una de las peores sequías de su historia, California debe maximizar su potencial de reutilización de agua”. Por su parte, Grant Davis, vicepresidente de la sección californiana y gerente de Sonoma County Water Agency, resalta que “ésta es la única propuesta significativa de financiación estatal para asegurar nuestros suministros futuros de agua regenerada”.

## **AVANCES REGLAMENTARIOS EN CALIFORNIA**

La década de los años 2010 ha registrado una intensa actividad reglamentaria sobre la reutilización del agua especialmente en California, en relación con la reutilización para el riego sin restricción de productos de consumo crudo, el riego de jardinería, la reutilización potable indirecta mediante recarga de acuíferos y de embalses, y las futuras opciones de reutilización potable directa. Son iniciativas de gran interés para todos los interesados en la implantación de la reutilización planificada del agua.

En septiembre de 2012 se publicó el informe final titulado *Review of California’s Water Recycling Criteria for Agricultural Irrigation*, en el que se recogen una serie de recomendaciones elaboradas por un Panel Asesor independiente convocado por el National Water Research Institute (NWRI, 2012) y destinadas al Departamento de Salud Pública de Estado. La primera y principal tarea del Panel fue valorar si el agua producida, en conformidad con los criterios de calidad del agua regenerada del Estado, ofrecía la suficiente protección sanitaria para su utilización en el riego de productos de consumo humano.

Mediante un modelo de evaluación cuantitativa de riesgo microbiológico (QMRA), revisado por colegas expertos, el Panel obtuvo estimaciones medias anualizadas del riesgo de infección para tres posibles opciones de reutilización del agua, obtenida mediante tres procesos de regeneración. Las estimaciones medias anualizadas del riesgo de infección resultantes

ofrecieron la evidencia adicional necesaria para confirmar que “unas prácticas agronómicas en consonancia con esas formas de uso no aumentan de forma detectable el riesgo sanitario y que una posible modificación de las normas de calidad, para hacerlas más restrictivas, no mejorarían de forma detectable la salud pública”.

El Panel confirmó la conveniencia de adoptar una estrategia de regeneración basada en una línea de tratamiento de barreras múltiples capaz de satisfacer los límites de calidad, incluso cuando se avería la unidad de tratamiento más efectiva. No obstante, el Panel resaltó que la desinfección del agua es el proceso crítico de la regeneración para reutilización en riego agrícola y que un fallo total de este proceso resultaría con toda seguridad en el incumplimiento de las normas de calidad microbiológica del agua regenerada. Por ello, el Panel recomendó centrar la atención en la fiabilidad y el control del proceso de desinfección para los usos no potables del agua regenerada. Por último, el Panel recomendó la utilización de los coliformes totales como indicadores de la calidad sanitaria del agua, en razón del historial tan satisfactorio que estos indicadores han registrado durante más de un siglo, especialmente para la vigilancia del agua de consumo humano.

El Panel examinó la creciente preocupación por la posible incorporación de patógenos humanos en los tejidos vegetales. Aunque hay evidencia de que esa incorporación se llega a producir en condiciones de laboratorio con exposición a elevadas concentraciones de patógenos, la vía de contaminación más realista durante el riego agrícola era la adhesión de esos patógenos a la superficie de las plantas, de modo que su posterior higienización pueda ser menos efectiva. Éste parece haber sido el mecanismo de contaminación asociado con las recientes intoxicaciones alimentarias registradas en el Estado, ninguna de las cuales ha estado asociada con el uso de agua regenerada para riego. En 2012, no se disponía de pruebas definitivas sobre posibles intoxicaciones alimentarias o infecciones esporádicas asociadas con el riego de productos hortícolas con agua regenerada en California, ni tampoco con el riego extensivo con agua regenerada que se realiza en Florida. El riego de productos hortícolas con agua regenerada en el condado de Monterey es un ejemplo local y emblemático del uso de agua regenerada durante un largo período de tiempo, sin que se hayan detectado efectos desfavorables sobre la salud pública.

En junio de 2014, el Departamento de Salud Pública completó la aprobación de la normativa aplicable a la recarga de acuíferos con agua regenerada (State Water Board, 2014). Conviene resaltar que, desde el 1 de julio de 2014, la competencia institucional sobre la calidad del agua regenerada paso desde el Departamento de Salud Pública al Consejo de Recursos Hídricos, dependiente de la Agencia de Protección Ambiental, en cuya página web se puede encontrar el texto reglamentario correspondiente. Este texto reglamentario fue el resultado de varios años de debate y reflexión, contando con la larga experiencia operativa de diversas agencias dedicadas a la recarga de acuíferos potables con agua regenerada situadas en el sur del Estado y muy especialmente del proyecto GWRS. En la actualidad, la recarga de acuíferos con agua regenerada constituye una línea estratégica de actuación prioritaria, especialmente en el sur del Estado, como forma de asegurar la fiabilidad de los abastecimientos ante irregularidades meteorológicas y climatológicas tan intensas como las registradas durante la sequía de los años hidrológicos 2012 a 2016.



En 2015, la WateReuse Research Foundation publicó un marco de referencia para la RPD (WRRF, 2015), elaborado por un panel de asesores independientes, bajo el patrocinio de las dos grandes asociaciones profesionales del agua, la American Water Works Association y la Water Environment Federation, junto con el National Water Research Institute. El objetivo de este documento fue recopilar la información disponible sobre el valor de la RPD como una opción de abastecimiento de agua e identificar los elementos necesarios para la implantación de un programa de RPD. Mediante la adopción de la RPD como un elemento integrante de las fuentes de abastecimiento de una población, ésta puede conseguir numerosos beneficios, tales como aumentar la fiabilidad del suministro de agua, reducir la huella de carbón, potenciar el beneficio de los suministros naturales de agua y controlar el coste final del agua.

En marzo de 2018, el Consejo Estatal del Agua aprobó la propuesta de normativa relativa a la incorporación planificada de agua regenerada en embalses de aguas superficiales que se utilicen para el abastecimiento de consumo humano (State Water Board, 2018). El agua regenerada no se suministra directamente a los consumidores para su ingestión, sino que se aporta a un embalse desde donde, tras la mezcla con otras aguas superficiales, puede ser captada y sometida a un proceso de potabilización antes de ser abastecida a los usuarios para su consumo. La normativa contó con el informe técnico preceptivo de un Panel de Expertos que concluyó favorablemente sobre la capacidad de dichos criterios de calidad para ofrecer una protección adecuada de la salud pública.

Siguiendo el mandato de leyes aprobadas en 2010 y 2013 por el Senado californiano, el Consejo Estatal del Agua recibió la petición de investigar y de informar a los órganos legislativos sobre la viabilidad de desarrollar unos criterios normativos uniformes sobre la regeneración del agua para su RPD, antes del 31 de diciembre de 2016. Para atender esa petición legislativa, convocó dos grupos independientes, un Panel de Expertos integrado por científicos e ingenieros y un Grupo Asesor integrado por agentes sociales involucrados en el uso del agua. El objetivo de ambos grupos fue asesorar al Consejo Estatal del Agua sobre las problemáticas relativas a la viabilidad de desarrollar unos criterios uniformes sobre la regeneración del agua para su reutilización potable directa. Las recomendaciones del Panel de Expertos y del Grupo Asesor han servido para establecer los fundamentos de la investigación y los resultados adoptados por el Consejo Estatal del Agua en su Informe Preliminar (State Water Board, 2016). Los informes del Panel de Expertos (State Water Board, 2016b) y del informe final del Grupo Asesor (State Water Board, 2016c) aparecen como anexos del Informe Preliminar al Consejo Estatal del Agua.

A partir de esos estudios, el legislador requirió al Consejo Estatal del Agua que adoptara unos criterios uniformes para la reutilización potable del agua mediante su incorporación en puntos aguas arriba de la entrada a una estación de potabilización, para lo que el Consejo ha establecido un programa de colaboración con la Water Research Foundation y el National Water Research Institute para completar las investigaciones necesarias antes de 2021-22.

En resumen, los Paneles asesores se han convertido en un elemento esencial y efectivo del proceso normativo, en parte porque representa también una nueva actitud pro-activa “desde los usuarios hacia las instituciones” (*bottom up*), en un marco de colaboración institucional muy favorable, incluyendo los usuarios y los gestores, de una parte, y las instituciones responsables

de la protección de la salud pública y la gestión de los recursos hídricos, de otra. La experiencia de la última década, tanto en California como en varios otros Estados, indica que este proceso normativo tiene un gran potencial para avanzar de forma eficiente, rápida y satisfactoria, especialmente en el ámbito de cada Estado, que son quienes tienen las competencias exclusivas sobre la reutilización de agua. Conviene resaltar que las diferencias existentes entre normativas estatales no son objeto de comentarios o críticas sobre su idoneidad por parte de otros Estados, ni tampoco lo es la calidad de los productos cultivados en unos u otros estados, siempre que respeten las normas aplicables. La experiencia de más de 30 años en California no muestra evidencia alguna de causalidad entre el uso de agua regenerada para riego sin restricción de productos hortícolas y la salud de los consumidores.

## **LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS**

Entre los avances más destacados conseguidos durante las últimas décadas por los estudios sobre los recursos hídricos de la biosfera cabe destacar dos: 1) el reconocimiento de la existencia de una relación cuantitativa y cualitativa entre las diferentes formas físicas en que se presentan los recursos hídricos y entre éstas y otros componentes de la biosfera, como el flujo de energía y la presencia de seres vivos y 2) la consideración del medio ambiente “per se” como un usuario legítimo de esos mismos recursos hídricos (DOCU, 2000).

Los recursos hídricos forman parte de un sistema, constituido por un conjunto de elementos relacionados entre sí y con todos los demás elementos de la biosfera; de este modo, una modificación puntual de uno de ellos genera una alteración de los restantes elementos, cuya actividad conjunta viene determinada por flujos de energía. Este planteamiento ha llevado a designarlos en su conjunto con el nombre de ecosistema acuático y también con la expresión de “ciclo del agua”. Por otra parte, la consideración del agua como un elemento esencial del ecosistema que forma la biosfera, más allá de las utilidades que las personas puedan hacer de esos recursos hídricos, ha llevado a nuevas concepciones de lo que debe ser una gestión más equilibrada de los recursos, como la que establece la Directiva Marco del agua (DOCU, 2000).

En este contexto, la gestión integrada o sistémica de los recursos hídricos trata de definir una asignación armónica y equilibrada de los mismos entre los diferentes usos o aprovechamientos, teniendo en cuenta las relaciones existentes entre los diferentes componentes de esos recursos y en particular el papel determinante que el agua tiene para la preservación y la mejora del medio ambiente.

Para atender los aprovechamientos urbanos, agrícolas e industriales y también para asegurar la preservación del medio ambiente, se dispone de diversas opciones con las que asegurar la garantía de suministro requerida. Las opciones disponibles en orden creciente de complejidad y de especificidad son: 1) la protección y la mejora de las fuentes convencionales de agua, 2) el ahorro de agua y su uso eficiente, 3) la regulación o el almacenamiento de volúmenes adicionales de agua, 4) el intercambio de recursos entre diferentes usuarios, 5) la regeneración y la reutilización planificada del agua y 6) la desalación de aguas salobres y marinas.



La utilización de cualquiera de estos elementos de gestión requiere una valoración objetiva de sus beneficios, limitaciones y requisitos, de modo que sea posible alcanzar conclusiones bien justificadas y coherentes. En ese proceso, los criterios de valoración de su sostenibilidad ambiental, social y económica constituyen elementos básicos a tener en cuenta. Conviene resaltar que los resultados de esta valoración objetiva, de carácter eminentemente técnico, ofrecen un fundamento sólido a tener en cuenta en los posteriores planes, programas y políticas de recursos hídricos que establezcan las administraciones y los gobiernos.

La gestión integrada o sistémica de los recursos hídricos se rige fundamentalmente por tres criterios operativos:

1. Diversificar las alternativas utilizadas, como forma de asegurar la garantía o la fiabilidad de la solución conjunta. El hecho de que las sociedades desarrolladas hayan alcanzado la explotación casi completa de los recursos hídricos convencionales, los más inmediatos o fáciles de desarrollar, hace con frecuencia que sea prácticamente inviable la obtención de soluciones “únicas” o “absolutas” a los retos actuales y que, por tanto, deba recurrirse a la aplicación de una serie coordinada de soluciones parciales que resuelvan el problema de una manera conjunta.
2. Utilizar una combinación equilibrada tanto de infraestructuras como de formas de gestión que, con agilidad y flexibilidad, potencien la capacidad y las posibilidades de unas y otras para armonizar las ofertas con las demandas, en el espacio y en el tiempo.
3. Planificar sistemáticamente esas actuaciones, especialmente las infraestructuras y las formas de gestión, para asegurar tanto la consecución de sus objetivos técnicos y económicos como su debate, revisión y aceptación, con transparencia y participación de todos los usuarios, incluidos los encargados de preservar y mejorar el medio ambiente.

Normativas legales recientes como la Directiva Marco (DOCU, 2000) y las propuestas de organismos internacionales y de asociaciones profesionales como la Association of California Water Agencies (ACWA, 2005) enfatizan la importancia de estos tres criterios operativos. El Plan de Acción titulado “*No Time to Waste*”, publicado por la ACWA, ilustra el interés y el orden de prioridad de estas alternativas de gestión. El Plan de Acción describe “una serie de actuaciones y de inversiones destinadas a resolver las necesidades de agua en California durante las próximas décadas, con objeto de que las autoridades estatales y federales puedan contribuir al desarrollo del sistema de abastecimiento de agua que California necesita para sustentar su población, sus puestos de trabajo y sus ecosistemas en el futuro” (ACWA, 2005).

Entre las recomendaciones clave de este Plan de Acción pueden destacarse: 1) la mejora de los sistemas de captación y abastecimiento de agua en el delta de los ríos Sacramento y San Joaquín, 2) la evaluación de los peligros que, a largo plazo, afectan a los diques de contención del agua dulce en el delta, 3) la continuación de las tareas de protección de los sistemas estatales de abastecimiento de agua y del medio ambiente, 4) el desarrollo de capacidades adicionales de regulación de aguas subterráneas y superficiales y 5) el estímulo y la financiación de los esfuerzos locales para ampliar tanto la reutilización planificada del agua como el uso eficiente del agua y la desalación de aguas marinas y aguas salobres.

Como ejemplo de la similitud de las inquietudes que afectan a los redactores de este plan con las que encontraron los autores de la propuesta 2000 del Plan Hidrológico Nacional, puede

indicarse que una de las limitaciones más significativas de los cauces españoles a finales de los 1990 era la falta de calidad del agua en ciertos tramos de ríos y en embalses, lo que dificultaba los posibles trasvases de aguas entre cuencas. A este respecto, las mejoras alcanzadas con la aplicación progresiva de los planes de saneamiento de las Comunidades Autónomas y el cumplimiento de los límites de vertido requeridos por la Directiva 91/271 (DOCU, 1991) han potenciado la implantación de una mejor gestión de los recursos hídricos.

## REGULACIÓN DE RECURSOS

La regulación del agua mediante embalses constituye una de las facetas más controvertidas de la gestión de los recursos hídricos. Además del papel fundamental de los embalses para regular un régimen de precipitaciones tan irregular como el español, los embalses ofrecen la protección de las poblaciones y de los recursos naturales ante las catastróficas consecuencias que las avenidas y las inundaciones causadas por esos regímenes de lluvia pueden y suelen causar en las cuencas de nuestros ríos (Mujeriego, 2005).

La alteración del flujo de sedimentos, con el consiguiente almacenamiento en el propio embalse y el consecuente déficit en zonas de sedimentación deltaica, junto con la alteración del flujo de agua y de la circulación de ciertos componentes de la fauna (truchas, salmones) son alteraciones que conviene remediar en infraestructuras existentes y que pueden ser evitadas con formas de construcción modernas. La instalación de una rampa de desviación de sedimentos, en la cabecera del embalse, contribuye a mantener el flujo de sedimentos a través de la franja de río afectada. La construcción de embalses en derivación (*off-stream, embanked*) permite limitar significativamente las afecciones ambientales. El Diamond Valley Lake, del Metropolitan Water District of Southern California (MWD, [www.mwdh2o.com](http://www.mwdh2o.com)), con una capacidad de 1.000 hm<sup>3</sup>, representa un ejemplo emblemático de cómo se pueden regular los caudales de aguas superficiales excedentes en tiempos de abundancia, para ser posteriormente turbinados y liberados en los canales de abastecimiento, en momentos de escasez. La inversión unitaria de este embalse en derivación, delimitado por tres presas de materiales sueltos y construido atendiendo a los requisitos ambientales del momento, fue de 2,0 dólares del año 2000 por cada m<sup>3</sup> de capacidad. Este coste unitario es similar al de 1,7 euros por metro cúbico de capacidad del embalse de 7 hm<sup>3</sup> construido en Vitoria-Gasteiz en 2004.

El uso conjunto de aguas superficiales y aguas subterráneas es una estrategia ampliamente estudiada y debatida en España (ITGE, 2000) que sólo ha alcanzado una aplicación limitada, incluso tras los episodios de sequía y escasez de recursos experimentados durante las últimas décadas en diversas zonas del país. Como ejemplo del potencial que ofrece este elemento de gestión, puede citarse el caso del Metropolitan Water District (MWD), distribuidor en alta de agua de abastecimiento para 18 millones de habitantes del sur de California. El MWD inició desde principios del presente siglo acuerdos como el establecido en 2005 con seis municipios y comunidades de regantes dotadas de acuíferos, que le permitió dotarse de una capacidad de regulación de 230 hm<sup>3</sup>, volumen ligeramente superior a la capacidad del Lake Mathews, el segundo embalse por capacidad de California. El acuerdo establecido en febrero de 2005 con la ciudad de Compton, contemplaba la posibilidad de infiltrar hasta 2,8 hm<sup>3</sup> de agua excedentaria del trasvase desde el Delta Sacramento-San Joaquín a Los Ángeles, a cambio de

una aportación de 2,42 millones de dólares, destinada a la rehabilitación de las tuberías y los pozos utilizados por la ciudad para la gestión de su abastecimiento a partir del acuífero en cuestión. Este acuerdo representó un coste de 0,86 \$/m<sup>3</sup> de capacidad de regulación, amortizables durante 25 años.

Esta estrategia de almacenar agua superficial en los acuíferos utilizados para abastecimiento y regadío es una forma de implantar el concepto de “banco del agua” en California, con la particularidad de que se realiza entre operadores públicos y/o privados, sin la intervención directa de la administración estatal de los recursos hídricos, aunque con su conocimiento formal y la necesidad de respetar las reglamentaciones municipales, estatales y federales aplicables.

El coste creciente (económico y energético) que comporta la doble red de distribución de agua regenerada, especialmente para riego agrícola y de jardinería, así como para otros usos no potables, a medida que aumenta la distancia entre la ERA y la ubicación de los usuarios, está planteando la conveniencia de optar de forma prioritaria y complementaria por una regeneración avanzada del agua. Esta nueva etapa de la regeneración permite alcanzar niveles de calidad similares o superiores a los del agua de consumo público, posibilitando así su posterior incorporación “directa” a la red de distribución de agua de consumo público, y evitando la implantación de una nueva red de distribución de agua regenerada no potable (Schroeder *et al.*, 2012). La aplicación más vanguardista en el mundo de esta opción de reutilización es la que viene funcionando en Windhoek capital de Namibia, desde 1968 (<http://www.wingoc.com.na/process.html>), donde unos 15.000 m<sup>3</sup>/día de agua regenerada, obtenida mediante procesos avanzados desarrollados localmente, son incorporados directamente a la red de abastecimiento de consumo humano, alcanzando un 20% de la aportación de agua a la red. Diversas poblaciones del estado de Texas, en EEUU, como Big Spring adoptaron esta estrategia en 2010, para paliar la intensa sequía que llegaron a experimentar y que les privaba de casi cualquier fuente de suministro convencional de agua. Estos proyectos entraron en funcionamiento en 2013, motivados por la continuación de la sequía plurianual que estaban experimentando grandes zonas de Texas. Posteriormente, algunos de esos proyectos han sido adaptados a una RPI, mediante el vertido del agua regenerada a fuentes de agua convencionales, antes de su potabilización y distribución para abastecimiento público. En la actualidad, el proyecto más vanguardista de RPD es el que se está construyendo en la ciudad de El Paso, en Texas, y que está previsto que entre en funcionamiento en un futuro muy próximo. Los procesos de regeneración avanzada adoptados en estos proyectos son muy similares a los que OCWD ha venido desarrollando para la RPI en California y cuentan con la aprobación de las autoridades sanitarias de Texas.

## DESALACIÓN

La desalación de agua es una alternativa técnica bien consolidada, que ha experimentado un auge considerable debido al continuo progreso registrado en el desarrollo de las membranas de ósmosis inversa necesarias para la separación de las sales contenidas en el agua. Los principales progresos de esta tecnología han permitido la utilización de nuevos materiales sintéticos, más resistentes a la temperatura, a la presión, a la acción del ensuciamiento

biológico y a la acción de los compuestos químicos utilizados para su limpieza, así como el desarrollo de sistemas más eficaces de presurización del agua y sobre todo de recuperación de la energía contenida (presión) en el agua producida. Los datos experimentales más recientes indican una cierta estabilidad en las mejoras de ciertas facetas esenciales del proceso, especialmente en su consumo energético unitario. Las membranas de ósmosis inversa consiguen la separación de los iones y las moléculas disueltas mediante su difusión diferencial a través del material de la membrana, siendo las moléculas o los iones de menor tamaño los que más fácilmente la atraviesan. Por otra parte, se han identificado ciertos contaminantes del agua, especialmente de naturaleza orgánica, que tienen una afinidad especial por el material de la membrana y que la atraviesan con relativa facilidad, al margen de su tamaño molecular. La vida útil de las membranas de ósmosis inversa garantizada por la mayoría de fabricantes es de cinco años, pasados los cuales deben sustituirse. Conviene resaltar que, al contrario de lo que ocurre con otros procesos de tratamiento de agua, las membranas alcanzan su mayor eficacia y durabilidad cuando se hacen funcionar en régimen continuo. La interrupción excesiva y la parada prolongada de su funcionamiento se traducen normalmente en un deterioro acelerado de sus características filtrantes, lo que puede obligar a una sustitución anticipada.

California es un líder mundial en la fabricación de vasijas a presión para el alojamiento de las membranas de ósmosis inversa en la configuración de enrollamiento en espiral. California y Japón son dos de los líderes mundiales en la fabricación de membranas de ósmosis inversa. No obstante, la desalación de agua en California había alcanzado una implantación muy limitada hasta diciembre de 2015, en que entró en funcionamiento la estación de desalación de agua de Carlsbad. El informe sobre *Water Desalination - Findings and Recommendations*, elaborado por un grupo de expertos para el Departamento de Recursos Hídricos en octubre de 2003 (DWR, 2003), indica que las 40 instalaciones dedicadas hasta ese momento a la desalación de aguas salobres (incluyendo ósmosis inversa e intercambio iónico) representaban una producción anual de 210 hm<sup>3</sup>, mientras que las 16 instalaciones de desalación de agua marina generaban tan sólo unos 6 hm<sup>3</sup> de agua anualmente. La entrada en funcionamiento de la estación de desalación de Carlsbad ([www.carlsbaddesal.com/](http://www.carlsbaddesal.com/)) junto a la planta de energía nuclear de Encina, en el condado de San Diego, ha significado la aportación de 70 hm<sup>3</sup> de agua anuales para el abastecimiento público del condado.

La desalación de aguas marinas no había cambiado significativamente hasta 2012, ya que los proyectos propuestos habían suscitado debates muy controvertidos en municipios, condados y consorcios, estando sometidos a prolongados procesos de aprobación y de obtención de permisos reglamentarios. La razón fundamental de la escasa implantación de la desalación de aguas marinas en California sigue siendo el coste estimado del agua desalada, superior a los 0,80 \$/m<sup>3</sup> de agua en alta que MWD cobraba a sus miembros en 2012 (0,35-0,40 \$/m<sup>3</sup> en 2003), incrementado en 0,05-0,10 \$/m<sup>3</sup> cuando se incluyen los gastos de distribución. Conviene indicar a este respecto que el contrato firmado a finales de noviembre de 2012 por la Autoridad Hídrica del Condado de San Diego con Poseidon Water, la empresa privada promotora de la estación de desalación de agua de Carlsbad, comporta la compra de 70 hm<sup>3</sup>/año de agua desalada durante los próximos 30 años, a un coste de hasta 1,5 €/m<sup>3</sup>.

El informe del DWR (2003) incluye una descripción clara y detallada de las consideraciones básicas a tener en cuenta para la implantación de una instalación de desalación de agua: 1) la

necesidad de contar con una captación de agua aceptable ambientalmente, 2) la necesidad de disponer de un sistema de dilución y dispersión de las salmueras generadas durante el proceso, y 3) la conveniencia de disponer de una fuente de energía eléctrica económica, en razón del considerable consumo unitario de estas instalaciones. Una de las estrategias adoptadas para satisfacer esos requisitos consiste en situar la planta desaladora en las inmediaciones, si no en la misma propiedad, de una central eléctrica dotada de sistemas de refrigeración con agua de mar. De este modo, 1) la captación de agua marina puede ser la misma que la utilizada para refrigerar la central eléctrica, una vez que el agua ha pasado por las torres de refrigeración, 2) la dilución y el vertido de las salmueras pueden hacerse mediante su incorporación al caudal de aguas de refrigeración, aprovechando los sistemas de dispersión del agua de la central para diluir y dispersar las salmueras y 3) la energía eléctrica puede obtenerse directamente de la central, minimizando los costes de distribución y de transporte, y pudiendo incluso disfrutar de unas tarifas especiales.

Además de las ventajas técnicas que ofrecen las dos primeras opciones, la posibilidad de evitar la aprobación de un nuevo estudio de impacto ambiental para la captación y el vertido, o simplemente complementar la tramitación de un informe ya aprobado, hace que la ubicación preferente de una planta de desalación de agua sea la zona inmediata a una central energética, en estrecha coordinación funcional con la misma. La planta de desalación de aguas de Carboneras, en la costa almeriense, y la ubicación adoptada para la planta de Carlsbad en el sur de California han adoptado esta estrategia para su implantación.

Entre las recomendaciones explícitas del informe del DWR (2003) cabe resaltar la conveniencia de adoptar una captación de agua a partir de pozos costeros, en lugar de tomas en mar abierto, ante la creciente evidencia del efecto benéfico que los sistemas de protección y filtración de los pozos pueden causar en la flora y la fauna marinas, tanto macroscópica como microscópica, propias de la franja costera, que es la más productiva del medio marino.

La ubicación de las plantas de desalación de efluentes depurados, tal como se plantea en numerosas mancomunidades de las Islas Canarias, sigue una estrategia similar a la indicada: la materia prima es el efluente tratado de una depuradora situada cerca de la costa, la dilución y el vertido de las salmueras se realiza mediante un emisario, y la aportación energética se suele gestionar mediante la implantación coordinada de aerogeneradores, con unos notables rendimientos energéticos debido al régimen de viento tal favorable de las Islas. Esta misma estrategia de ubicación y gestión de vertidos es la adoptada en instalaciones de desmineralización de aguas regeneradas como las del GWRS, patrocinado conjuntamente por el OCWD y el OCSD ([www.gwrssystem.com](http://www.gwrssystem.com)).

## **REUTILIZACIÓN Y DESALACIÓN**

La reutilización planificada y la desalación de agua tienen varios elementos en común que conviene resaltar. En primer lugar, utilizan una fuente de materia prima no convencional y en cierto modo mucho más abundante que los recursos convencionales de aguas dulces superficiales y subterráneas, especialmente cuando se piensa en el agua marina para la desalación. En segundo lugar, el agua resultante de ambos procesos necesita de conductos

específicos para su incorporación a las redes de distribución de agua. Así, el agua regenerada se suministra mediante un conducto específico (para evitar su contacto con el agua de calidad potable), que puede ya existir cuando se trata de una sustitución de agua para riego agrícola o de jardinería, o que es necesario construir cuando se trata de una nueva actividad. Por otra parte, la incorporación del agua desalada a una red de abastecimiento, tanto para abastecimiento humano como para otros usos, requiere una conducción desde la planta de desalación hasta el depósito de almacenamiento o la incorporación a la red abastecimiento que se trata de abastecer. En ambos casos, el coste de la conducción suele ser notable, aunque su importancia relativa es mayor en el caso de la regeneración, debido al menor coste unitario del agua regenerada con respecto al del agua desalada.

Tanto la regeneración como la desalación alcanzan su utilización óptima cuando las instalaciones funcionan de forma continuada y sistemática, de modo que los costes fijos de la inversión puedan distribuirse sobre el mayor volumen de agua producido. La circunstancia de que la inversión de una instalación de desalación alcance usualmente un mínimo de 4 €/año/m<sup>3</sup>, en comparación con un valor inferior a 0,5 €/año/m<sup>3</sup> de la regeneración, hace que una planta de desalación deba ser explotada de forma casi permanente, con objeto de alcanzar la máxima producción anual de agua. Su justificación económica es absolutamente similar a la de una central nuclear, en cuanto que debe proporcionar una aportación de energía (o de agua, en el caso de la desalación) lo más estable posible. La gran diferencia entre la producción de energía y la producción de agua es que mientras la energía no se puede almacenar directa y fácilmente, el agua desalada o regenerada sí se puede almacenar, mediante la utilización de acuíferos, depósitos o embalses de regulación.

Una de las estrategias más eficaces y económicas de producir agua regenerada o agua desalada es utilizar una planta con una producción media igual a la requerida por el uso o el aprovechamiento que se considere, y disponer de un dispositivo de regulación que permita ajustar la disponibilidad y el consumo temporal de esos mismos usos. Esta propuesta óptima se puede ajustar mediante pequeños cambios en el factor de punta de la planta de producción y el nivel de cobertura del dispositivo de regulación. La ausencia de un sistema de regulación puede limitar considerablemente el alcance de la reutilización o la desalación del agua, además de aumentar considerablemente su coste unitario.

La materia prima utilizada usualmente para la regeneración suele ser un buen efluente secundario de origen municipal, mientras que la desalación suele plantearse con agua marina o salobre. No obstante, caben soluciones intermedias, que acercan considerablemente los conceptos de regeneración y de desalación. La utilización de agua salobre como materia prima para la desalación ofrece la gran ventaja económica de un menor consumo energético unitario, en cuanto que éste guarda una relación casi lineal con el contenido de sales del agua. Mientras que las aguas salobres suelen oscilar en torno a los 5 g/L de sales disueltas, las aguas de mar contienen en torno a 35 g/L de sales disueltas, con lo que el consumo de energía para desalar agua de mar puede ser de hasta 4 veces superior al de desalar aguas salobres (desalobrar). Estos valores vienen determinados por el tipo y la calidad del agua, la capacidad de la planta, el tipo de tecnología y la temperatura del agua. Otra limitación importante de la desalación de aguas salobres es la disponibilidad en el tiempo de caudales de agua suficientes, generalmente en acuíferos costeros; la sobre-explotación o el agotamiento del acuífero pueden obligar a

suspender temporalmente la extracción de agua. El vertido final de las salmueras resultantes de los procesos de desalación plantea un importante reto operativo, especialmente si las instalaciones están alejadas de la costa.

La utilización de un buen efluente secundario de origen municipal como fuente de agua para la regeneración es una estrategia bien demostrada en proyectos como el GWRS desarrollado durante 25 años en el Orange County Water District ([www.ocwd.com](http://www.ocwd.com)). La versión actualizada y ampliada de este concepto se está llevando a cabo en varias partes del mundo, en particular en Singapur ([www.pub.gov.sg/newater](http://www.pub.gov.sg/newater)) y recientemente en la ciudad de San Diego, (<http://www.sandiego.gov/water/waterreuse/demo/>) mediante el *Water Purification Demonstration Project*, muy similar en su concepción al del GWRS, aunque con una capacidad futura considerablemente inferior. La ventaja de esta alternativa de regeneración-desalación es que utiliza una fuente de agua suficientemente abundante en la mayoría de los casos (efluente secundario), especialmente en zonas costeras, donde los efluentes tratados se vierten al mar, con efectos indeseables en algunos casos. Los datos del proyecto GWRS indican que el coste del agua regenerada-desalada producida, incluyendo los dispositivos de distribución a una barrera de intrusión salina y a las lagunas de recarga artificial de acuíferos, es actualmente de 0,39 \$/m<sup>3</sup>, valor notablemente inferior a los 0,80 \$/m<sup>3</sup> que pueden costar las aguas superficiales obtenidas por MWD desde el trasvase del Delta Sacramento-San Joaquín.

Un último aspecto a destacar de ambas formas de generar recursos hídricos no-convencionales es la importancia trascendental que tiene establecer un acuerdo contractual, lo más específico posible, entre los responsables de la producción del agua regenerada y/o desalada, y los futuros utilizadores de ese mismo producto. El incumplimiento de este elemento de gestión plantea sistemáticamente numerosas dificultades durante la puesta en marcha de la planta de producción de agua. La experiencia de numerosas encuestas y proyectos de reutilización de agua pone de manifiesto que los usuarios potenciales tienen inicialmente una predisposición favorable a utilizar el agua regenerada; no obstante, llegado el momento de utilizarla, suelen plantear numerosos impedimentos a su aceptación. Mientras que el impedimento más frecuente para la reutilización de agua regenerada suele ser de tipo psicológico, debido a la percepción del posible riesgo sanitario que su utilización puede comportar, el impedimento más frecuente para la utilización del agua desalada suele ser de tipo económico, ante su mayor coste unitario con respecto al de los recursos convencionales.

Así se explica que una instalación como la existente en Andarax, en Almería, con capacidad para producir 50.000 m<sup>3</sup>/día no haya entrado en pleno funcionamiento desde que fue terminada en 2002, por una falta de acuerdo en la forma de establecer las tarifas municipales. Del mismo modo, el que la planta de desalación de Carboneras, con una capacidad de 120.000 m<sup>3</sup>/día y completada en 2003, sólo produzca agua principalmente para alimentar la central térmica del mismo nombre, sita en sus inmediaciones, se debe a la dificultad de aplicar los acuerdos establecidos inicialmente con las comunidades de usuarios de las zonas limítrofes.

En definitiva, mientras que la regeneración y la reutilización planificada del agua en España han sido impulsadas por el deseo de los usuarios de disponer de recursos adicionales de agua, la desalación ha sido generalmente (especialmente en las zonas peninsulares) una propuesta de las administraciones para ofrecer recursos adicionales o alternativos.



## **GESTIÓN SOCIO-ECONÓMICA DE LA REUTILIZACIÓN**

Los episodios de sequía plantean con frecuencia fuertes tensiones entre los diversos usuarios de los recursos hídricos, a la vez que potencian el interés de todos ellos por fuentes de agua no convencionales, como forma de obtener soluciones mucho más fiables a la falta de recursos convencionales. La reglamentación española asigna al consumo humano prioridad sobre otros usos. Esto hizo que la aplicación de las medidas para mitigar los efectos de las sequías registradas entre 2005 y 2008 en España, y particularmente en las comunidades autónomas de Cataluña, Valencia, Murcia, Andalucía y Madrid, suscitase intensos debates entre los usuarios urbanos y agrícolas del agua, y propiciase un renovado interés por la reutilización planificada del agua como forma de resolver los déficits coyunturales o crónicos de agua.

Establecer el precio y el coste del agua regenerada es un proceso determinante de la operatividad y el éxito de cualquier programa de reutilización planificada de agua. Este proceso es complejo, debido fundamentalmente a que suele ser más costoso suministrar agua regenerada que mantener un abastecimiento de agua potable, a pesar de que el agua regenerada básica tiene una calidad inferior a la del agua potable (Cuthbert y Hajnosz, 1999). Mientras que los costes de abastecimiento de agua potable suelen estar basados en inversiones pasadas, y en cierto modo amortizadas, los proyectos de suministro de agua regenerada han de enfrentarse a unas inversiones y a un régimen de explotación y mantenimiento que, de acuerdo con los métodos tradicionales de asignación de costes, hacen que el coste del agua regenerada pueda ser igual o incluso superior al del agua de abastecimiento público.

El dilema en estos casos es evidente: si el agua regenerada se factura a su precio real de coste, los usuarios no tendrán generalmente un incentivo suficiente para utilizarla; por otra parte, si el agua regenerada se factura a un precio inferior a su coste de producción, convendrá obtener una compensación con otras fuentes de ingresos. La cuestión que se plantea en este caso es determinar quién debe hacerse cargo de esos gastos y cuál ha de ser su cuantía. La aplicación de una gestión integrada de beneficios y de costes está ayudando a resolver esos retos, que con frecuencia dificultan el progreso de la reutilización del agua. No obstante, los beneficios a largo plazo de la utilización del agua regenerada han hecho que numerosos servicios públicos de abastecimiento de agua de consumo humano y de suministro de agua de riego estén promoviendo su implantación.

La gestión económica de la reutilización planificada es especialmente compleja y difícil en poblaciones de los EEUU, donde es común que la gestión del ciclo del agua la realicen separadamente dos instituciones con objetivos independientes: 1) las entidades dedicadas al abastecimiento de agua (Water District), cuyo objetivo es gestionar los recursos existentes y promover nuevos recursos y 2) las entidades dedicadas al saneamiento del agua (Sanitation District), cuyo objetivo es gestionar la depuración y el vertido de los efluentes depurados.

La reutilización planificada el agua adquiere una nueva dimensión cuando se contempla desde un punto de vista de la gestión integrada, más amplio y sistémico que el tradicional (entidades diferentes que gestionan una parte del ciclo del agua), de modo que sea posible evidenciar su potencial para: 1) evitar los mayores costes de nuevas fuentes de abastecimiento de agua potable, siempre que éstas sean realmente posibles y 2) evitar los mayores costes que pueden



representar las mejoras en la depuración y el vertido requeridas por nuevas limitaciones sanitarias y ambientales. Un ejemplo emblemático de esta situación es el proyecto GWRS, promovido a partes iguales por el OCWD y el OCSD, con el objetivo inicial de regenerar y reutilizar 90 hm<sup>3</sup> de agua anualmente que, con un presupuesto total de 427 millones de dólares, se inició en el año 2003 y entró en servicio a principios de 2008 (<http://gwrsystem.com/>). El proyecto GWRS fue ampliado en 2015, de modo que produce 130 hm<sup>3</sup> anuales de agua, mediante una inversión adicional de 143 millones de dólares.

Mediante este proyecto compartido, el OCWD ha desarrollado unos recursos de agua realmente adicionales y difíciles de obtener desde fuentes convencionales (trasvases del Delta Sacramento-San Joaquín o del río Colorado) y el OCSD ha evitado el coste de mejorar el grado de depuración de sus efluentes y de ampliar el emisario submarino utilizado para disponer sus efluentes depurados en el océano Pacífico. Ambas instituciones públicas salieron beneficiadas, al alcanzar unos objetivos esenciales, pero con un coste inferior al que habrían tenido que asumir para alcanzarlos separadamente.

La gestión del ciclo del agua en el contexto de una cuenca hidrográfica, tal como se ha venido aplicando tradicionalmente en España y como la Directiva Marco del Agua propugna en Europa, ofrece un marco excelente y muy favorable para llevar a cabo una gestión integrada o sistémica de los recursos hídricos, en la que los requisitos económicos y financieros de la reutilización planificada pasan a ser un elemento más a tener en cuenta dentro del balance general de costes y beneficios de la cuenca. La creación de los Organismos de Cuenca, como responsables de la gestión integrada de los recursos, permite que los proyectos de reutilización planificada puedan beneficiarse de los ahorros e incluso de los beneficios derivados de no tener que recurrir a nuevas y costosas fuentes de abastecimiento de agua potable. El desarrollo reglamentario del Dominio Público Hidráulico y la implantación de instrumentos de gestión para el Intercambio de Derechos de Uso del Agua ofrecen grandes posibilidades para una mejor gestión de los recursos y posibilitan la incorporación del agua regenerada como un nuevo elemento dinamizador del sistema.

Entre los beneficios más destacables de la reutilización planificada cabe resaltar la mayor disponibilidad de agua pre-potable que ello conlleva, cuando se sustituye por agua regenerada, y la mayor garantía de los suministros de agua regenerada, que permite mitigar o suprimir las restricciones que habrían de aplicarse durante periodos secos, evitando las enormes pérdidas que los periodos de sequía meteorológica comportan usualmente. Si a esto se unen las posibilidades de coordinación entre recursos superficiales y recursos subterráneos, mediante las posibilidades de regulación que estos últimos ofrecen, así como los ahorros y el uso eficiente del agua en usos agrícolas, puede concluirse que la gestión integrada permite mejorar sustancialmente la disponibilidad de recursos para los diferentes usuarios, así como una mayor garantía de esos mismos recursos.

En realidad, los intercambios de recursos entre usuarios vienen teniendo lugar en zonas mediterráneas españolas desde tiempo inmemorial, aunque las sequías recientes y el aumento de los consumos urbanos y agrícolas de las últimas décadas los hayan hecho más frecuentes y evidentes. Estas cesiones de recursos entre usuarios agrícolas, y entre usuarios agrícolas y urbanos, vienen propiciados por su capacidad de: 1) mantener inalterados los derechos

concesionales y 2) aportar beneficios a todos los partícipes. Cabe pensar por tanto que, si los instrumentos de gestión para el Intercambio de Derechos de Uso del Agua permitiesen establecer formas contractuales que respondan de forma adecuada a esas dos inquietudes de los usuarios, los intercambios serían una realidad cada vez más frecuente y mejor planificada.

## **LA REUTILIZACIÓN Y LA GESTIÓN INTEGRADA DEL AGUA**

Los proyectos de reutilización implantados en la geografía española han permitido realizar una valoración económica cada vez más precisa de la regeneración y de la reutilización del agua. Esa valoración se ha venido planteando fundamentalmente desde dos puntos de vista: 1) el coste de producir el agua regenerada y 2) el coste de ponerla a disposición del usuario, como elementos básicos para la asignación de costes a los futuros beneficiarios del recurso. No obstante, este enfoque puramente económico concuerda bien con la perspectiva de sociedades donde el recurso es generalmente de propiedad privada o es gestionado por dos entidades diferentes: una de abastecimiento y otra de saneamiento. Sin embargo, en un contexto europeo, donde el agua es un recurso público gestionado por la administración en el marco de las correspondientes cuencas hidrográficas, la correcta asignación del coste del agua debe plantearse en un marco de gestión integrada, de modo similar a como se hace cuando se plantean nuevas aportaciones mediante extracciones desde acuíferos, trasvases de cuencas o desalación de agua de mar. La experiencia obtenida en diversos proyectos de regeneración y de reutilización de agua en España muestra claramente la emergencia de beneficios ambientales y económicos poco evidentes y que conviene considerar por su enorme relevancia.

El Artículo 7 del Decreto 1620/2007 establece un procedimiento para la reutilización de aguas a través de iniciativas o planes de las Administraciones Públicas, y ofrece la posibilidad de que las Administraciones Públicas estatal, autonómica o local puedan llevar a cabo planes y programas de reutilización de aguas, con la finalidad de fomentar la reutilización del agua y el uso más eficiente de los recursos hídricos.

Entre las aplicaciones prácticas en que la reutilización del agua puede contribuir a mejorar la gestión integrada de los recursos, ofreciendo una mayor garantía de suministro a los usuarios, un coste global más reducido y una mayor protección ambiental, pueden mencionarse las siguientes:

1. La sustitución de aguas pre-potables utilizadas para riego por aguas regeneradas. Considerando que el coste marginal de las aguas pre-potables en un contexto de déficit suele ser considerablemente superior al del agua regenerada, y también al del agua pre-potable disponible convencionalmente, es posible plantearse un intercambio, tomando como referencia el coste del agua pre-potable que se libera, de modo que el concesionario inicial pueda implantar el riego con agua regenerada (producción y distribución) sin costes adicionales. En general, el coste marginal considerablemente mayor de las aguas pre-potables liberadas permitiría sufragar incluso los costes de producción y de conexión a la red de riego existente.
2. La aportación de agua regenerada para regadíos infradotados o nuevos regadíos agrícolas o de jardinería. El régimen económico y financiero de estas concesiones puede plantearse en el marco general de las alternativas disponibles, de modo que el

beneficiario sufrague el coste del proyecto, siguiendo unas pautas similares a las aplicadas a los usuarios de recursos convencionales. Aunque el coste de producción del agua regenerada es generalmente inferior al del agua potable convencional, la implantación de un conducto específico para su transporte hasta el punto de uso puede representar un coste adicional importante. No obstante, si la red de distribución ya existe, bastará con sufragar las instalaciones de conexión entre la estación de regeneración y la red de distribución de agua de riego existente.

3. La sustitución de caudales ambientales mediante agua regenerada de gran calidad justo aguas abajo de donde se produce la captación para abastecimiento, especialmente si ese punto de extracción es un embalse regulador. La disposición de agua regenerada en el punto de desembalse se puede convertir así en una reducción de los caudales de servidumbre para mantenimiento de caudales circulantes en el río, y en definitiva pasa a constituir una “aportación virtual” (o una menor extracción) de agua al embalse, con lo que ello significa de modificación de sus curvas de garantía y las posibilidades de utilización del agua embalsada. El caso de Vitoria-Gasteiz, en Álava, es uno de los más emblemáticos e ilustrativos de esta situación (Mujeriego y López, 2006), en donde se estima que cada metro cúbico aportado al río Zadorra, aguas abajo del embalse Urrunaga-Ullibarri, permite disponer de hasta 2 m<sup>3</sup> de agua del embalse para otros usos, manteniendo las mismas curvas de garantía de suministro establecidas.
4. El suministro de agua regenerada para mantenimiento ambiental, cuando la fuente de abastecimiento debe atender simultáneamente a usuarios urbanos y a un ecosistema acuático natural. El proyecto de abastecimiento de agua regenerada para el Parque Natural de los Aiguamolls de l’Empordà, patrocinado por el Consorci de la Costa Brava en 1998 con la ayuda de fondos europeos, ilustra el gran potencial que la regeneración y la reutilización del agua tienen para preservar un medio natural que de otro modo quedaría desprovisto de su fuente natural de agua durante el verano, debido a la prioridad del abastecimiento de la urbanización Empuriabrava, con una población máxima estimada de 45.000 habitantes. Este ejemplo de reutilización para usos ambientales ilustra de forma emblemática la necesidad de plantearse la recuperación de costes de forma diferente a la de pago por parte del usuario final en este caso: la flora y la fauna del parque natural. El coste de esta actuación se ha “integrado” en el balance global de gestión de los recursos de la zona, de modo que pueda ser sufragada por la población beneficiaria de los recursos hídricos naturales. En resumen, la población sufraga el cuidado de un medio natural que de otro modo quedaría prácticamente anulado, a cambio de disponer de una fuente adicional de recursos para abastecimiento.
5. La producción de aguas regeneradas, en lugar de las aguas depuradas que se vierten a ciertos cauces, como forma de disminuir los caudales desembalsados para poder diluir esos vertidos de efluentes depurados, de inferior calidad a los de agua regenerada. El vertido de efluentes depurados a cauces fluviales, con niveles de calidad como los exigidos por la Directiva 91/271, puede obligar a una aportación de caudales circulantes con objeto de diluirlos y asegurar así una cierta calidad ambiental en los tramos fluviales situados aguas abajo del vertido. La disposición de aguas regeneradas, en el punto de vertido original o incluso en puntos aguas arriba de esos vertidos, permite conseguir esos mismos objetivos de calidad, pero utilizando unos menores caudales de desembalse. Esas menores servidumbres de dilución modifican las curvas de garantía de los embalses, ofreciendo mayores posibilidades de gestión y sobre todo una mayor fiabilidad

- y disponibilidad del recurso para todos sus posibles usos.
6. El suministro de agua regenerada como alternativa a extracciones de aguas subterráneas en régimen de sobre-explotación. Iniciativas como las planteadas recientemente en el Área Metropolitana de Barcelona han de permitir que miembros de la Comunidad de Usuarios del Acuífero del Delta del Llobregat puedan recibir aguas regeneradas de gran calidad para usos industriales (donde son sometidas a tratamientos adicionales de desmineralización) a cambio de interrumpir sus extracciones del acuífero sobre-explotado. La firma de un tal acuerdo, en el que se mantendría la titularidad de la concesión aún sin ejercerla, permitiría que los usuarios dispusieran de un agua de mejor calidad (menor salinidad) que la obtenida del propio acuífero, con lo que ello significaría de ahorro en sus procesos de desmineralización posterior; por otra parte, esto permitiría que el acuífero se recuperase progresivamente por medios naturales, mitigando la intrusión salina y constituyéndose en una reserva estratégica de agua de creciente calidad. Esta agua subterránea podría ser utilizada de forma eficiente en momentos de escasez para usos tan diversos como abastecimiento, riego o mantenimiento ambiental.
  7. La recarga artificial de acuíferos con aguas regeneradas. El proyecto GWRS representa el proyecto más emblemático y de mayor envergadura del mundo, con una producción anual de 130 hm<sup>3</sup> de agua, desde 2015. De ellos, unos 85 hm<sup>3</sup>/año (65 %) se dedican a la recarga por infiltración de un acuífero potable, mientras que los otros 45 hm<sup>3</sup>/año (35 %) se utilizan para alimentar la barrera contra la intrusión salina de ese mismo acuífero. El coste del agua regenerada en los puntos de infiltración e inyección es aproximadamente de 0,47 \$/m<sup>3</sup>, que se reduce a 0,39 \$/m<sup>3</sup> tras aplicar las subvenciones de organismos federales, estatales y del MWD del sur de California (proveedor en alta de 18 millones de habitantes), como reconocimiento por la aportación de recursos adicionales. Este último precio es aproximadamente la mitad del que actualmente pagan los proveedores en baja para obtener caudales de aguas superficiales trasvasadas hasta esa zona para el suministro urbano.

Otras opciones de gestión integrada del agua que se están implantando, al margen o en coordinación con el uso de agua regenerada, son las siguientes:

1. La rehabilitación de los sistemas de riego agrícola (mejora de su eficiencia) a cambio de una fracción del agua ahorrada mediante esas medidas. Este planteamiento ya ha sido aplicado en España, siendo el Plan Delta en el río Ebro uno de los más recientes y más emblemáticos (Consorti d'Aigües de Tarragona, 1995). El revestimiento y mejora de 197 km de canales de riego, junto con la rehabilitación de instalaciones auxiliares, con un presupuesto total de 140 millones de euros en el año 2000 permitió ahorrar 12 m<sup>3</sup>/s de agua que se infiltraban por los canales de riego, de los cuales el Consorci d'Aigües de Tarragona recibió una concesión de 4 m<sup>3</sup>/s, equivalentes a 126 hm<sup>3</sup> anuales. En definitiva, una inversión de 1,10 €/año/m<sup>3</sup> permitió obtener una nueva concesión de agua pre-potable.

El Imperial Irrigation District del sur de California ([www.iid.com](http://www.iid.com)) viene proponiendo desde hace varios años una actuación similar para impermeabilizar 23 millas del All-American Canal, que le suministra 3.800 hm<sup>3</sup> de agua del río Colorado. El acuerdo consiste en que la Autoridad del Agua del Condado de San Diego pague 135,56 millones de dólares para revestir 37 km del canal, a cambio de recuperar 83,5 hm<sup>3</sup> de agua que se infiltran actualmente por el lecho de tierra del Canal. En definitiva, una inversión de

1,62 \$.año/m<sup>3</sup> permitirá obtener una nueva concesión de agua pre-potable, durante toda la duración del acuerdo. Hay que resaltar que esta iniciativa tiene lugar en un contexto de crecimiento urbano, de escasas precipitaciones y de sequías plurianuales como el del sur de California, donde el precio del agua pre-potable en alta llega a alcanzar actualmente 0,80 \$/m<sup>3</sup>.

2. La recarga artificial de acuíferos como forma de regular los recursos de aguas superficiales. Aunque la recarga artificial de acuíferos ha sido ampliamente estudiada y debatida en España (ITGE, 2000), sólo ha alcanzado una aplicación limitada, incluso tras los episodios de sequía y escasez de recursos experimentados durante las últimas décadas en diversas zonas del país. Como ejemplo del potencial que ofrece este elemento de gestión, puede citarse el caso de MWD ([www.mwdh2o.com](http://www.mwdh2o.com)), mediante los acuerdos que ha venido establecido durante la última década con 6 municipios y comunidades de regantes dotadas de acuíferos, mediante los cuales había conseguido dotarse de una capacidad de regulación de 230 hm<sup>3</sup> en 2003, ligeramente superior a la capacidad del Lake Matthews, el segundo embalse por capacidad del sur de California. Estos acuerdos han significado notables beneficios para las comunidades de regantes, entre los que cabe destacar: 1) una mayor garantía de sus disponibilidades de agua (disponen de un agua en depósito que pueden utilizar de forma reglamentada), 2) una menor profundidad de bombeo, en cuanto que los niveles piezométricos suben con el mayor volumen de agua almacenada y 3) una mejora de sus instalaciones, mediante las inversiones directas y los fondos en efectivo que MWD aporta con el acuerdo. Hay que resaltar que estos acuerdos necesitan generalmente de un trabajo laborioso y largo para su elaboración, pero avanzan de forma planificada.

La experiencia obtenida en diferentes zonas del mundo con déficits estacionales o crónicos de agua para usos agrícolas, de jardinería y urbanos, ofrece una amplia variedad de instrumentos técnicos, económicos, financieros y de gestión para resolver las fuertes tensiones producidas entre ellos durante los episodios de sequía hidrológica que se han venido registrando, y cuando tratan de atender las exigencias ambientales definidas por la Directiva Marco del Agua.

La consecución de un gran acuerdo marco entre los usuarios urbanos y los agrícolas, industriales y de ocio, en un contexto de gestión integrada del agua como el que ofrecen los Organismos de Cuenca, mediante instrumentos de gestión para el Intercambio de Derechos de Uso del Agua, u otros similares que puedan establecerse, constituye una vía muy favorable para satisfacer las necesidades de agua pre-potable para los abastecimientos públicos y de agua de riego para la agricultura y la jardinería.

La implantación de acuerdos contractuales para la utilización de aguas regeneradas que respondan a las inquietudes de calidad y de garantía de suministro del agua de riego y del agua industrial, a la vez que a los intereses económicos de los concesionarios, ofrece a la agricultura, a la jardinería y a la industria una alternativa práctica de enorme interés para resolver los retos que se le plantean ante el déficit y la irregularidad meteorológica de recursos, especialmente en las zonas costeras, a la vez que asegura un respaldo reglamentario ante las exigencias de calidad de los productos cultivados con ellas.

Todas esas consideraciones han de impulsar el notable salto cualitativo que convendrá plantearse a la hora de analizar la economía del agua regenerada: no solo cuantificar su coste, sino sobre todo estimar su valor. Los costes reales de opciones alternativas, como los trasvases y la desalación, y especialmente las medidas de urgencia para paliar las sequías hidrológicas como las adoptadas en Cataluña en 2008 (450 M€), ponen claramente de manifiesto la gran ventaja económica de la reutilización y la regeneración. Las recientes iniciativas de recuperación de caudales ambientales y sobre todo de mitigación de las irregularidades meteorológicas, tanto para abastecimiento como para preservación del medio natural, hacen que el agua regenerada y la reutilización del agua aparezcan como elementos determinantes para acrecentar el valor del agua, en sus múltiples facetas y usos.

La situación económica y financiera de esta primera década del siglo XXI y la creciente sensibilidad ambiental de las últimas décadas propiciarán sin duda nuevas formas de plantear los proyectos de regeneración y de reutilización, promoviendo una valoración más detallada y crítica de los costes económicos de otras fuentes, que aunque siendo elevados parecieron justificados en el pasado, y resaltando la ventaja económica y el mayor valor del agua que pueden aportar la regeneración y la reutilización del agua.

Los conocimientos y la experiencia acumulados durante los últimos 25 años, en zonas como el Consorci de la Costa Brava, el Área Metropolitana de Barcelona, el Camp de Tarragona, el área metropolitana de Madrid, las cuencas hidrográficas del Segura y del Júcar, las costas de Andalucía, las Islas Baleares y Canarias y otros numerosos puntos de España ponen claramente de manifiesto que sabemos regenerar y reutilizar el agua, que sabemos cuantificar sus costes económicos, tanto de inversión como de explotación y mantenimiento. El reto más inmediato es hacer de la regeneración y la reutilización un elemento más de la gestión integrada de los recursos, considerando especialmente el valor del agua, y no solo su coste económico de producción y utilización. Un valor que suele ser sin duda ampliamente superior al coste de regenerarla y reutilizarla.

## **NUEVOS RETOS Y POSIBILIDADES**

En 2008, el entonces Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino adoptó un plan para impulsar la gestión integrada de los recursos hídricos, mediante una asignación armónica y equilibrada de los mismos entre los diferentes usos o aprovechamientos, teniendo en cuenta las relaciones existentes entre los diferentes componentes de esos recursos y en particular el papel determinante que el agua tiene para la preservación y la mejora del medio ambiente. La Dirección General del Agua, dentro de los objetivos de la Directiva Marco del Agua, consideró necesario potenciar las actuaciones encaminadas a desarrollar el uso de la reutilización de agua regenerada, dada la importancia potencial que este recurso no convencional podía tener en la mejor gestión de los recursos hídricos a nivel nacional. El resultado de estas iniciativas fue la elaboración del Plan Nacional de Reutilización de las Aguas (PNRA) que fue presentado al proceso de información pública en diciembre de 2010.

El objetivo del PNRA era ofrecer una nueva herramienta de gestión destinada a incrementar la garantía de suministro de agua para los usos más exigentes y mejorar el estado de las aguas

mediante la sustitución de agua pre-potable por agua regenerada en determinados usos. Adicionalmente, las aguas regeneradas en zonas costeras podrían mejorar la disponibilidad neta de los recursos hídricos y el número de usos al que destinarlas. El calendario del PNRA incluía diversas infraestructuras de reutilización para un primer horizonte del año 2015 y un segundo horizonte a definir más allá de esa fecha. El presupuesto del PNRA ascendía a 350 M€ para cuyo cumplimiento planteaba diversas opciones de financiación pública y privada. Aunque el PNRA superó el proceso de información pública, su puesta en marcha quedó pospuesta, debido a la considerable limitación de fondos públicos disponibles desde 2011 hasta el momento (2018). El nuevo Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización (Plan DSEAR) inicia el proceso de información pública el 19 de octubre de 2018.

El estrecho nexo existente entre el agua y la energía, especialmente en todo lo relativo a los procesos de recogida, almacenamiento, tratamiento, distribución de agua potable y recogida y depuración de aguas residuales está intensificando las medidas destinadas a impulsar un uso cada vez más eficiente de la energía en la gestión de los recursos hídricos. El informe titulado California's Water-Energy Nexus: Pathways to Implementation (GEI Consultants, 2012) ilustra los retos y las posibilidades que ofrece una gestión integrada de la energía utilizada en el ciclo del agua, en particular mediante la laminación de los consumos punta de energía en ciclos horarios y sobre todo en el periodo estival.

El consumo energético asociado a los trasvases de agua y especialmente a la distribución de agua en nuevas redes de suministro de agua regenerada está propiciando un cambio de perspectiva en las opciones tradicionales de reutilización no potable del agua hacia la RPD del agua. El estudio realizado por Schroeder *et al.* (2012) plantea la RPD como una necesidad ineludible en un futuro próximo. Cuando se compara con otras opciones, la reutilización del agua es la opción con mejor beneficio-coste para la sostenibilidad a largo plazo. En el caso del Sur de California, la RPD ofrece enormes ventajas: la estabilización de las fuentes de abastecimiento de agua para grandes zonas urbanas y extensas zonas agrícolas, y unos ahorros energéticos debidos a la diferencia entre trasvasar agua (2,3 kWh/m<sup>3</sup>) y regenerar agua a nivel avanzado (1,2 kWh/m<sup>3</sup>) y que oscilan entre 0,7 y 1,0 TWh/año, equivalentes a 50-87 M\$ anuales. Estas circunstancias son aplicables a otras zonas urbanas y agrícolas del mundo.

Incertidumbre es el calificativo con que los estudios sobre cambio climático caracterizan todas sus estimaciones. En particular, incertidumbre sobre la disponibilidad de recursos hídricos en el futuro. Esta nueva visión está promoviendo un cambio sustancial en la forma de enfocar la gestión de los recursos, caracterizada por la utilización de dos nuevos elementos de gestión propios de las nuevas prioridades: 1) la resiliencia de los sistemas y las soluciones y 2) la adaptabilidad o flexibilidad de las soluciones. La irregularidad prevista para los episodios de lluvia, junto con el carácter torrencial de las mismas en zonas semi-áridas como las peninsulares españolas, plantean la conveniencia de ampliar la capacidad de “regular” los recursos hídricos, acumulando agua en épocas de abundancia para poder disponer de ella en momentos de escasez. La utilización de acuíferos, depósitos y embalses, especialmente contruidos fuera de los cauces de los ríos, ofrecen una solución efectiva a esa irregularidad, tanto del propio recurso hídrico, en cantidad y calidad, como del uso de la energía que se requiere para suministrarlo en momentos de puntas diarias o estacionales. La reciente

ampliación del embalse de San Vicente, en la zona metropolitana de San Diego, ilustra la estrategia de disponer de una mayor capacidad de acumulación de agua durante momentos de abundancia, en una zona que depende en gran medida de recursos trasvasados desde el Delta Sacramento-San Joaquín y el río Colorado. El recrecimiento de la presa de San Vicente (36 m adicionales sobre los 67 m actuales, aumentando sus 110 hm<sup>3</sup> de capacidad actual en 188 hm<sup>3</sup> adicionales) forma parte del Proyecto de Almacenamiento de Emergencia destinado a asegurar el suministro de agua a la región de San Diego en el caso de una interrupción de los trasvases de agua desde otras cuencas.

La publicación del informe “Agua regenerada: ¿qué seguridad ofrece?, patrocinada por la American Water Reuse Foundation (<http://www.asersagua.es/archivos/21.pdf>), ofrece una respuesta clara y cuantificada a la percepción pública del riesgo que comporta el uso del agua regenerada de calidad para usos como la agricultura, la jardinería y las actividades lúdicas. Documentos como ese, junto con campañas de información y participación pública, han contribuido a familiarizar al público en general y a los medios de comunicación con el uso de estas nuevas fuentes de recursos hídricos, tanto en aplicaciones bien conocidas como en otras que previsiblemente se desarrollaran en el futuro, entre ellas la RPD.

El libro titulado “*Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*” (Asano *et al.*, 2006) ofrece una visión completa y detallada de las numerosas facetas que integran la regeneración y la reutilización del agua, basada en estudios y experiencias obtenidas en numerosas zonas del mundo a partir de proyectos dedicados a producir agua regenerada para los más diversos usos, y en concreto de los proyectos más emblemáticos de RPI y RPD en el mundo.

Por último, el artículo “*La reutilización potable directa: entonces y ahora*” (Cotruvo, 2014) ofrece una magnífica perspectiva histórica de la reutilización potable en los EEUU desde los años 1960, junto con la visión de su autor, un experto sobre los temas pendientes de resolver en esta modalidad de reutilización. Los progresos realizados en la regeneración avanzada permiten producir un agua potable de la mejor calidad posible, al margen de la calidad de la fuente de suministro. El Dr. Cotruvo fue el primer director de la División de Normas del Agua de Consumo Público de la Agencia Medioambiental de los EEUU, desde donde desarrolló el Sistema de Asesoramiento Sanitario del Agua de Consumo Público y numerosas normas y criterios de calidad nacionales para esas mismas aguas.

## CONCLUSIONES

El análisis realizado en los apartados precedentes permite formular las siguientes conclusiones:

1. La reutilización planificada del agua es un componente esencial de la gestión integrada de los recursos hídricos, especialmente en zonas costeras, donde puede contribuir de forma significativa al aumento neto de dichos recursos. El progreso de la regeneración y la reutilización planificada del agua no depende solo de los avances tecnológicos, sino que necesita un marco reglamentario sólido y una voluntad política decidida.
2. La adopción de paneles asesores se ha convertido en un elemento esencial y efectivo del proceso normativo, por su gran potencial para avanzar de forma eficiente, rápida y satisfactoria, especialmente en un marco estatal. Las diferencias entre normativas



estatales no deberían ser objeto de comentarios o críticas sobre su idoneidad por parte de otros Estados, ni tampoco la calidad de los productos cultivados en ellos, siempre que sigan las normas de calidad aplicables.

3. La reutilización planificada del agua ofrece una garantía de suministro muy superior a la de las fuentes convencionales, asegurando la disponibilidad de caudales especialmente durante la temporada estival y posibilitando que las aguas de calidad pre-potable puedan utilizarse para abastecimiento público y mantenimiento ambiental.
4. La gestión del ciclo del agua en el contexto de una cuenca hidrográfica ofrece un marco excelente y muy favorable para implantar una gestión integrada de los recursos hídricos, en la que los requisitos económicos y financieros de la reutilización planificada pasan a ser un elemento del balance de costes y de beneficios de la cuenca.
5. La regeneración, la regulación y la desalación son tres opciones prácticas de gestión de los recursos hídricos, con unos costes de inversión crecientes a medida que se pasa de la primera a la última. Una valoración completa de las mismas requiere tener en cuenta también los costes de inversión en las redes de distribución que puedan ser necesarias.
6. La regeneración de agua para usos no potables ha adquirido un gran desarrollo en numerosas partes del mundo, en particular en las zonas costeras e insulares españolas, donde ha alcanzado unas excelentes cotas de fiabilidad y de aceptación por parte de los usuarios y del público en general.
7. La reutilización potable indirecta se aplica desde hace unos años como concepto innovador en unos pocos lugares del mundo, el sur de California, Bélgica, Singapur y el sudeste de Australia. Su objetivo común es generar una nueva fuente de agua de abastecimiento público, más fiable ante la irregularidad meteorológica, utilizando procesos de regeneración avanzada similares y utilizando una de las dos opciones de “naturalidad” posibles: un acuífero costero o un embalse de regulación.
8. El consumo energético de los trasvases de agua y especialmente el coste significativo de la distribución de agua regenerada no potable mediante nuevas redes de suministro está propiciando un cambio de perspectiva en las opciones tradicionales de reutilización no potable del agua hacia la reutilización potable directa (RPD) del agua, una opción casi ineludible en un futuro próximo en zonas semiáridas del mundo.
9. Unas infraestructuras de regeneración avanzada como las disponibles en el Área Metropolitana de Barcelona y un proyecto de recarga de acuífero potable como el que se está realizando en El Port de la Selva (Girona) ofrecen dos puntos de referencia inigualables para implantar un ambicioso programa de seguimiento e investigación de su capacidad técnica para responder a las inquietudes sanitarias, ambientales y sociales que puedan plantear las autoridades sanitarias y el público en general. Ese programa permitiría impulsar la auto-suficiencia de la zona metropolitana de Barcelona, y generar un escaparate de la competencia científica y técnica internacional en el campo de la gestión de los recursos hídricos en España.
10. Conviene plantearse un salto cualitativo en la gestión de la economía del agua regenerada: estimar su valor, en lugar de limitarse a cuantificar su coste. Los costes reales de opciones alternativas, como los trasvases y la desalación, y especialmente las medidas de urgencia para paliar sequías hidrológicas como las registradas en Cataluña y la costa mediterránea en 2008 pusieron claramente de manifiesto la gran ventaja económica que ofrecen la regeneración y la reutilización planificadas del agua.

11. El episodio de sequía que ha afectado a California durante cinco años consecutivos (2012 a 2016) ofrece un marco incomparable para el seguimiento y el estudio de las diversas iniciativas técnicas y reglamentarias que pueden implantarse para gestionar los recursos hídricos en zonas semi-áridas como las mediterráneas españolas, en anticipación a similares episodios de sequía que puedan registrarse.

## AGRADECIMIENTOS

Los estudios y experiencias documentados en este trabajo han sido posibles gracias a la colaboración y el apoyo económico que diversas instituciones públicas nos han brindado desde 1985, entre la que merecen ser destacadas el Consorci de la Costa Brava, el Área Metropolitana de Barcelona, la antigua Junta de Sanejament de la Generalitat de Catalunya, la Agència Catalana de l'Aigua, la Diputación Foral de Álava, la Comunidad de Regantes Arrato, el Ministerio de Educación y Ciencia, el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Medio Marino, la Fundación del Instituto Euromediterráneo de Hidrotecnia, el Programa d'Estudis Catalans Gaspar de Portolà del Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació de la Generalitat de Catalunya, el Institut d'Estudis de la Seguretat y el Departament de Economia i Finances de la Generalitat de Catalunya. La acogida de la Universidad de California en Davis, del Orange County Water District entre marzo de 2002 y enero de 2003 y la American WateReuse Association, así como de los contactos continuados posteriores, han sido determinantes del conocimiento y el acceso tanto a sus propias instalaciones como a numerosas otras iniciativas de regeneración y reutilización básica y avanzada del agua.

## REFERENCIAS

- Área Metropolitana de Barcelona (2011). Water Reuse Project of the Barcelona Metropolitan Area. WateReuse Barcelona 2011. Página web de la Asociación Española de Reutilización Sostenible del Agua: [www.asersagua.es](http://www.asersagua.es).
- Asano, T. , Burton, F.L., Leverenz, H. L., Tsuchihashi, R. and Tchobanoglous, G. (2006). Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications. Metcalf and Eddy/AECOM. McGraw-Hill.
- Asano, T. (Editor) (1998). Wastewater Reclamation and Reuse. Water quality management library, Vol. 10. Technomic Publishing Co. Inc. Lancaster, PA, USA.
- Association of California Water Agencies (ACWA) (2005). No Time to Waste, A Blueprint for California Water. [www.acwa.com](http://www.acwa.com). Sacramento, California.
- Boletín Oficial de la Provincia de Girona (2013). Anuncio de aprobación definitiva de la modificación de una ordenanza reguladora de precios públicos. No. 227, de 27 de noviembre de 2013, pág. 94.
- Consorci d'Aigües de Tarragona (1995). El Plan Delta. [www.ccaait.com](http://www.ccaait.com).
- Consorci de la Costa Brava (2005). Actas de las Jornadas técnicas sobre La Integración del Agua Regenerada en la Gestión de los Recursos: el Papel Dinamizador del Territorio. Lloret de Mar, octubre de 2005. [www.ccbgi.org/jornades2005](http://www.ccbgi.org/jornades2005).
- Cotruvo, J. A. (2014). Direct potable reuse: then and now. World Water: Water Reuse &

- Desalination. Spring 2014 issue, pp. 10-13.
- Cuthbert, R.W. y Hajnosz, A.M. (1999). Setting reclaimed water rates. *Journal of the American Water Works Association*, Vol. 91, no. 8, pág. 50-57.
- Del Río, F., López, J. y de Juana, I. (1996). Reutilización del agua residual, experiencias prácticas en Vitoria. Comunicación presentada en la XVII Jornadas de la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento.
- Department of Water Resources, Estate of California (2003). *Water Desalination - Findings and Recommendations*, Sacramento, California.  
[http://www.water.ca.gov/desalination/pud\\_pdf/Findings-Recommendations.pdf](http://www.water.ca.gov/desalination/pud_pdf/Findings-Recommendations.pdf)
- Diario Oficial de las Comunidades Europeas (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política del agua. L 327/1-71.
- Diario Oficial de las Comunidades Europeas (1991). Directiva 91/271/CEE del Consejo sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. L135/40-52.
- Entitat de Sanejament d'Aigües (2005). Gestión actual y reutilización de las aguas residuales en la Comunidad Valenciana. Curso de Verano de la Fundació Caixa de Castelló-Universitat Jaume I. Castellón.
- European Commission (2018). Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on minimum requirements for water reuse. COM (2018) 337 final.  
[https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/initiatives/com-2018-337\\_en](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/initiatives/com-2018-337_en)
- GEI Consultants (2012). California's Water-Energy Nexus: Pathways to Implementation.  
[http://www.geiconsultants.com/stuff/contentmgr/files/0/41a3b5d6d0c1d24e21a3a40c32c049c8/miscdocs/energy\\_nexus\\_white\\_paper\\_9\\_17\\_12\\_1.pdf](http://www.geiconsultants.com/stuff/contentmgr/files/0/41a3b5d6d0c1d24e21a3a40c32c049c8/miscdocs/energy_nexus_white_paper_9_17_12_1.pdf)
- Instituto Tecnológico Geominero de España (2000). Identificación de Acciones y Programación de Actividades de Recarga Artificial de Acuíferos en las Cuencas Intercomunitarias. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Levine, A, y Asano, T. (2004). Recovering sustainable water from wastewater. *Journal of Environ. Science and Technology*. American Chemical Society. June 1, pp: 201A-208A.
- Lahnsteiner, J., D. Sevitz y G. Lempert (2004). Potable reuse in Windhoek, Namibia. *Wabag*.
- Ministère des affaires sociales et de la santé (2014). Arrêté du 25 juin 2014 modifiant l'arrêté du 2 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts. JORF no. 0153 du 4 juillet 2014, page 11059 texte no. 29.  
ELI: <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2014/6/25/AFSP1410752A/jo/texte>
- Ministerio de la Presidencia (2007). Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. BOE núm. 294, sábado 8 diciembre 2007, pág. 50639-61.
- Mujeriego, R. (2009). La reutilització planificada de l'aigua: de l'eficiència a l'autosuficiència. Nota d'Economia, no. 93-94, Departament d'Economia i Finances, Generalitat de Catalunya.
- Mujeriego, R. (2007). La reutilización, la regulación y la desalación en la gestión integrada del agua. *La Sequía en España: Directrices para Minimizar su Impacto*. Dirección General del Agua, del Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 367 páginas, ISBN: 978-84-690-7328-5. Pág. 155-202.
- Mujeriego, R. (2004). La gestión del agua en el sur de California. *Ambienta*, no. 38, noviembre de 2004, pág. 31-38. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

- [www.mma.es/publicacion/ambienta/](http://www.mma.es/publicacion/ambienta/)
- Mujeriego, R. (Editor) (1990). Manual Práctico de Riego con Agua Residual Municipal Regenerada. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Mujeriego, R., Compte, J., Cazorra, T. y Gullón, M. (2008). The water reclamation and reuse project of El Prat de Llobregat, Barcelona, Spain. *Water Science & Technology*, Vol. 57, No.4, pp. 567-574.
- Mujeriego, R. y López, J. (2008). Water reuse and integrated water resources management in Vitoria-Gasteiz, Spain. *Water Practice and Technology*, Vol. 3, Issue 2. International Water Association Publishing 2008.
- Mujeriego, R., and López, J. (2006). The Azúa Valley Lake and integrated water resources in Vitoria-Gasteiz. *Proceed. of the Intern. Symp. on Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the 21st Century*, Berga et al (eds), June 2006, Barcelona. Taylor and Francis Group, London, Vol. 1, pp. 117-124.
- National Water Research Institute (NWRI) (2012). Review of California's Water Recycling Criteria for Agricultural Irrigation; Recommendations of an NWRI Independent Advisory Panel. Publication Number NWRI-2012-03.  
[https://www.waterboards.ca.gov/drinking\\_water/certlic/drinkingwater/Documents/Recharge/NWRI\\_AgPanelReportforCDPHFINAL-09-2012.pdf](https://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/Documents/Recharge/NWRI_AgPanelReportforCDPHFINAL-09-2012.pdf)
- Organización Mundial de la Salud (2006). Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater. Cuatro volúmenes.
- Pettygrove, G.S. y Asano, T (Editores) (1984). Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater, A Guidance Manual. California State Water Resources Control Board, report no. 84-1 wr. Republished by Lewis Publisher, Inc. in 1985.
- Sala, L. y Serra, M. (2004). Towards Sustainability in water recycling, *Water Science and Technology*, vol. 50, no. 2, 1-8.
- Sala, L. y Millet, X. (1995). Aspectos básicos de la reutilización de las aguas residuales regeneradas para el riego de campos de golf. *Jornadas Técnicas de la Federación Española de Golf*. Madrid. Publicado por el Consorcio de la Costa Brava, Girona, en 1997.
- Sanz, J., Suescun, J., Molist, J., Rubio, F., Mujeriego, R. y Salgado, B. (2015). Reclaimed water for the Tarragona petrochemical park. *Water Science & Technology: Water Supply*; Vol. 15.2 ; 2015. Doi: 10.2166/ws.2014.114
- Schroeder, E., Tchobanoglous, G., Leverenz, H.L., and Asano, T. (2012). Direct Potable Reuse: Benefits for Public Water Supplies, Agriculture, the Environment, and Energy Conservation. White Paper by the National Water Research Institute. <http://www.nwri-usa.org/documents/NWRIWhitePaperDPRBenefitsJan2012.pdf>
- State Water Resources Control Board (2018). Regulations for Surface Water Augmentation using Recycled Water.  
[https://www.waterboards.ca.gov/board\\_decisions/adopted\\_orders/resolutions/2018/rs20180014\\_with\\_regs.pdf](https://www.waterboards.ca.gov/board_decisions/adopted_orders/resolutions/2018/rs20180014_with_regs.pdf)
- State Water Resources Control Board (2016a). Investigation on the feasibility of developing uniform water recycling criteria for direct potable reuse.  
[http://www.waterboards.ca.gov/drinking\\_water/certlic/drinkingwater/documents/rw\\_dpr\\_criteria/draft\\_report\\_to\\_legislature\\_dpr\\_public\\_review.pdf](http://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/documents/rw_dpr_criteria/draft_report_to_legislature_dpr_public_review.pdf)
- State Water Resources Control Board (2016b). Expert Panel final report.  
[http://www.waterboards.ca.gov/drinking\\_water/certlic/drinkingwater/documents/rw\\_dpr\\_criteria/app\\_a\\_ep\\_rpt.pdf](http://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/documents/rw_dpr_criteria/app_a_ep_rpt.pdf)

State Water Resources Control Board (2016c). Final Report.

[http://www.waterboards.ca.gov/drinking\\_water/certlic/drinkingwater/documents/rw\\_dpr\\_criteria/app\\_b\\_ag\\_rpt.pdf](http://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/documents/rw_dpr_criteria/app_b_ag_rpt.pdf)

State Water Resources Control Board (2014). Regulations for groundwater replenishment.

[https://www.waterboards.ca.gov/drinking\\_water/certlic/drinkingwater/documents/gwreplenishmentregulation/DPH-14-003EFinalText.pdf](https://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/documents/gwreplenishmentregulation/DPH-14-003EFinalText.pdf)

United States Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory and U.S. Agency for International Development (2012). Guidelines for Water Reuse. EPA/600/R-12/618, September 2012. Office of Water, Washington, D.C., y Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio. Produced by CDM Smith Inc.

WaterReuse Research Foundation (2015). Framework for Direct Potable Reuse, an Independent Advisory Panel. Cosponsored by American Water Works Association, Water Environment Federation and National Water Research Institute. WaterReuse Project Number: 14-20. ISBN: 978-1-941242-30-8.

