

# EL USO DEL AGUA REGENERADA EN LA RECREACIÓN Y RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS ACUÁTICOS: LA EXPERIENCIA PRÁCTICA EN LA COSTA BRAVA

Sala, Lluís<sup>1</sup> & Romero de Tejada, Sergio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Consorci de la Costa Brava. Plaça Josep Pla 4, 3er 1ª. 17001 Girona. E-mail: [lsala@cbbgi.org](mailto:lsala@cbbgi.org)

<sup>2</sup> Parc Natural dels Aiguamolls de l'Empordà. El Cortalet. E-17486 Castelló d'Empúries. E-mail: [sromero@gencat.net](mailto:sromero@gencat.net)

## Resumen

En las zonas de España donde existe escasez de agua la situación suele ser manifiestamente acuciante para los ecosistemas acuáticos. A pesar de la próxima entrada en vigor de la Directiva Marco del Agua no va a ser fácil el revertir la tendencia de las últimas décadas, en las cuales en muchas cuencas, especialmente en las mediterráneas, se ha producido un aprovechamiento de los recursos disponibles que ha superado el límite de lo razonable para la preservación de dichos ecosistemas. Por ello, y en ausencia de caudales naturales, en algunos casos puede ser adecuado el reclamar aquellas aguas depuradas de buena calidad que son vertidas al medio para ser empleadas en atender las demandas ambientales.

La regeneración de estos efluentes mediante tecnologías naturales produce una mejora de la calidad del agua basada en el desarrollo de redes tróficas a partir de aquellos nutrientes aún disueltos en el agua y que, si fueran vertidos al medio, serían causantes de eutrofización. Ésta es la idea con la que se abordan determinados proyectos que combinan el tratamiento adicional del agua ya depurada con la recreación y/o restauración ambientales. En Holanda se ha desarrollado dicho concepto bajo el nombre de Waterharmonica (“acordeón del agua”, [www.waterharmonica.nl](http://www.waterharmonica.nl)), dado que actúa como zona de transición entre el vertido y el medio receptor. Paralelamente, en el ámbito del Consorci de la Costa Brava se han llevado a cabo distintas experiencias que conllevan como resultado la recreación y la restauración de algunos de los ecosistemas acuáticos locales y que igualmente responden a la filosofía de dicha escuela holandesa.

De los distintos proyectos en funcionamiento en la Costa Brava el más emblemático es seguramente el de los humedales construidos de Empuriabrava. Allí se lleva a cabo un tratamiento adicional del agua depurada mediante unos humedales que reducen el contenido de nutrientes del agua y que además son una zona de interés ornitológico por sí mismos, aparte de proveer al Parc Natural dels Aiguamolls de l'Empordà con una nueva fuente de agua de calidad para sus demandas ambientales. Otros proyectos con incidencia indirecta pero positiva sobre ecosistemas acuáticos son los de Tossa de Mar y del valle d'Aro, con beneficios ambientales sobre las rieras de Tossa y Ridaura, respectivamente.

Esta ponencia repasará las características fundamentales de dichos proyectos y propondrá recomendaciones prácticas para el uso del agua depurada como elemento clave en la recreación y restauración de ecosistemas acuáticos.

## Introducción

En las décadas recientes, la evolución de la demanda total de agua en España se ha incrementado de manera importante. Durante este período, España ha pasado de ser un país con una relativamente escasa transformación de sus paisajes tradicionales a sufrir –o a disfrutar, según el ángulo desde el que se mire– una importante transformación socio-económica. Por un lado, han aumentado de manera notable las superficies agrícolas de regadío, lo cual desde un punto de vista estrictamente hidráulico ha conllevado una paralela disminución de los caudales naturales de los ríos de los que se ha tomado el agua, y por otro también se ha desarrollado un importantísimo sector turístico que no sólo ha supuesto un incremento del consumo de agua –menor que el anterior, no hay que olvidarlo– sino que además se ha convertido en uno de los principales motores de la economía del país. Finalmente, es cierto que también ha habido un destacable desarrollo del sector industrial, pero en general su impacto seguramente se ha notado más por sus vertidos que por la cantidad de agua extraída del medio.

Todo ello ha implicado que durante este período las aguas con función puramente medioambiental y/o de reserva, ya sean ríos, lagos o acuíferos, han sido la reserva hídrica a explotar, la que ha cedido los volúmenes necesarios con los que cubrir una siempre creciente demanda. Un caso paradigmático de ello serían las hoy maltrechas Tablas de Daimiel, en la cuenca alta del río Guadiana, afectadas por la disminución de los niveles freáticos provocada por las fuertes extracciones de la agricultura de regadío (Velasco Lizcano, 2001). En una época como la presente, de elevada sensibilidad social ante los trasvases, hay que alertar también no sólo del trasvase de energía que requieren las desaladoras, sino también del trasvase de agua entre usos, siendo los ecosistemas acuáticos las perennes cuencas cedientes. Si además todo ello lo enmarcamos en una zona como la mediterránea, con grandes fluctuaciones climáticas, especialmente en lo que respecta a precipitaciones, se concluye fácilmente que en períodos de sequía el estrés impuesto por el consumo actual de agua sobre los ecosistemas acuáticos es en algunos casos poco menos que brutal.

La próxima entrada en vigor de la Directiva Marco de la Unión Europea, prevista para el año 2010, debería forzar un cambio de dirección en la forma en la que se han explotado los recursos hasta ahora, para así poder cumplir con el objetivo central de dicha directiva, que no es otro que el buen estado ecológico de las masas de agua una vez atendidas todas las demandas. Este objetivo, que no deja de ser una muy loable pero difícilmente cumplible cuadratura del círculo, implica necesariamente una evaluación de los recursos actualmente disponibles y una muy cuidadosa revisión de las demandas existentes, que permita además diferenciar las esenciales de las no esenciales para así poder ganar recursos con los que atender a las demandas ecológicas. Un ejemplo: para regar los parques, jardines y parterres de nuestras ciudades o para la limpieza viaria no es necesaria la utilización del agua de la red potable, sino que existen fuentes alternativas de agua adecuadas para cubrir las demandas no potables, como por ejemplo las aguas regeneradas. Atender las demandas no esenciales con recursos alternativos significa realizar una menor extracción en los ecosistemas acuáticos, lo cual ayuda a la conservación del recurso, además de reducir los vertidos.

La recuperación de caudales para ser destinados a usos ambientales o, mejor dicho, para recuperar la funcionalidad plena y el potencial biológico de nuestros ecosistemas acuáticos implica que la más alta prioridad debe ser siempre la sustitución de caudales, para así contar con los de mejor calidad para ser destinados a este uso. Sin embargo, lo óptimo y deseable no siempre es posible, de manera que en algún caso puede ser preferible el uso de un recurso

alternativo, como la propia agua regenerada, antes que la no intervención, que quizás en algún caso pueda significar una perturbación de mayor grado (deseccación) que no la que se pueda producir por el uso de este tipo de recursos.

El uso doméstico del agua es claramente no consuntivo, al menos en un porcentaje muy elevado, lo cual quiere decir que los volúmenes captados de agua no desaparecen, sino que son vertidos de nuevo a un cauce con un grado inferior de calidad respecto a la que tenían en el punto de captación. Dado que los ciudadanos consumimos agua a diario, incluso en épocas de sequía, éste es un recurso limitado en cuanto a volúmenes pero relativamente constante en el tiempo y que permite una planificación bastante afinada de cara a su posterior aprovechamiento. Además, no hay que olvidar que el agua depurada no es otra cosa que la propia agua potable –la de mejor calidad que había en la zona- pero con un aporte de sustancias contaminantes realizado por la actividad humana. Si estas sustancias son de origen orgánico y no tóxico, nada impide que a este agua se le restituya en gran parte su calidad original y pueda ser utilizada para la restauración y/o recreación de los ecosistemas acuáticos en aquellos lugares en que estén afectados tanto por falta de caudales como por problemas de contaminación.

Óbviamente, para este tipo de actuaciones hay que partir de un agua depurada (efluente secundario) de elevada calidad, ya que de otra forma podría ser peor el remedio que la enfermedad. Sin embargo, si partimos de un agua adecuada, la recuperación de estos efluentes y su regeneración mediante tecnologías naturales –siempre que la superficie necesaria, por disponibilidad o por precio, no sea un factor limitante- produce una mejora de la calidad del agua basada en el desarrollo de redes tróficas a partir de aquellos nutrientes aún disueltos en el agua y que, si fueran vertidos al medio, serían causantes de eutrofización. Ésta es la idea con la que se abordan los proyectos que combinan el tratamiento adicional del agua ya depurada con la recreación y/o restauración ambientales. En Holanda, Kampf & Claassen (2005) han desarrollado dicho concepto, al cual le han dado el nombre de Waterharmonica (“acordeón del agua”, [www.waterharmonica.nl](http://www.waterharmonica.nl)), en el sentido de que dicho sistema actúa como zona de transición entre el vertido y el medio receptor. Paralelamente, en el ámbito del Consorci de la Costa Brava (Girona) se han llevado a cabo distintas experiencias que conllevan como resultado la recreación y la restauración de algunos de los ecosistemas acuáticos locales y que igualmente responden en gran medida a la filosofía de dicha escuela holandesa, a pesar de haber sido desarrollados de forma independiente (Sala et al., 2006).

En los últimos 10 años, en la Costa Brava se han puesto en funcionamiento distintos proyectos de mejora ambiental en los que la reutilización del agua y/o la mejora de la gestión de los recursos han jugado un papel preponderante. De todos ellos, seguramente el más emblemático es el de los humedales construidos de Empuriabrava, una gran urbanización asentada sobre antiguas marismas y perteneciente al municipio de Castelló d’Empúries. Allí se lleva a cabo un tratamiento adicional del agua depurada (efluente secundario nitrificado y desnitrificado) en la EDAR de dicho núcleo urbano mediante unos humedales construidos de una superficie total de 7 ha, que no sólo terminan de reducir el contenido de nutrientes del agua, sino que además son una zona de interés ornitológico por sí mismos. Además, el agua efluente del sistema de humedales provee al Parc Natural dels Aiguamolls de l’Empordà con una nueva fuente de agua de calidad con la que mejorar la gestión ambiental de algunas zonas. Otros proyectos existentes en la Costa Brava con incidencia positiva -aunque indirecta- sobre ecosistemas acuáticos son los de Tossa de Mar y de la Vall d’Aro, con beneficios ambientales sobre las rieras de Tossa y Ridaura, respectivamente (Ordeix et al., 2005; Sala et al., 2005).

Con esta ponencia se pretende aportar elementos de referencia para un adecuado diseño de las futuras actuaciones de reutilización de aguas para usos ambientales, en base a unas experiencias surgidas a partir de proyectos reales.

## **La calidad del agua**

### *El cambio de paradigma*

En la reutilización de las aguas depuradas para usos ambientales ya no sirven como referencia los parámetros clásicos con los que se evalúan los rendimientos de depuración. Parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la materia en suspensión (MES) son claramente insuficientes para determinar si un agua depurada es apta para su reutilización ambiental. Un agua depurada que simplemente cumpla con la legislación general sobre vertidos, en la que los límites son de 25 mg/l para la DBO y de 35 mg/l para la MES, normalmente no será adecuada para este tipo de aplicaciones. En la reutilización para usos ambientales es indispensable contar con un agua depurada que prácticamente no ejerza demanda de oxígeno en el medio receptor, lo cual quiere decir que no sólo la DBO tiene que estar alrededor de los niveles de detección del método ( $< 5$  mg/l), sino que además las concentraciones de nitrógeno amoniacal deben ser las mínimas posibles (preferentemente, por debajo de 5 mg  $\text{NH}_4\text{-N/l}$ , según la experiencia empírica en el sistema de humedales construídos de Empuriabrava). Ello supone, por tanto, contar un efluente secundario bien nitrificado como materia prima para llevar a cabo este tipo de actividades.

### *La necesidad de la nitrificación*

Un buen efluente secundario de una EDAR de fangos activados convencional, que cumpla con la legislación de vertidos, puede tener por ejemplo una concentración de DBO de 15 mg/l y una concentración de nitrógeno amoniacal de 30 mg  $\text{NH}_4\text{-N/l}$ . Estos últimos no se ven reflejados en la medida de la DBO dado que el método indica la necesidad de utilizar un inhibidor de la nitrificación, ya que lo que se busca es cuantificar la demanda de oxígeno asociada al carbono orgánico. Sin embargo, dado que la estequiometría de la reacción de nitrificación nos indica que por cada mg  $\text{NH}_4\text{-N}$  a oxidar se necesitan 4,3 mg  $\text{O}_2$ , un simple cálculo nos advierte que la demanda real de oxígeno que este efluente ejerce sobre el medio receptor es de 144 mg/l ( $(30 \text{ mg } \text{NH}_4\text{-N/l} \times 4,3 \text{ mg } \text{O}_2/\text{mg } \text{NH}_4\text{-N}) + 15 \text{ mg } \text{O}_2/\text{l}$ ). Es cierto que una parte del nitrógeno amoniacal permitirá el desarrollo de poblaciones de fitopláncton, las cuales aportarán importantes concentraciones de oxígeno al medio, pero no hay que olvidar que la actividad fotosintética introduce  $\text{CO}_2$  de la atmósfera al medio acuático, con lo que la cantidad de carbono orgánico total aumentará y el oxígeno generado continuará siendo insuficiente para la total degradación de las sustancias reductoras. Además, en casos de vertidos o de aplicación de estas aguas a lagunas, las zonas ricas en oxígeno se limitarán simplemente a la superficie de las mismas, hasta allí donde llegue la luz, mientras que en las zonas más profundas y oscuras sólo habrá consumo, con lo cual la tendencia a la anoxia será muy marcada, especialmente en los meses de verano. Finalmente, el disponer de abundantes nutrientes en el medio, y más si es en forma amoniacal, generará una gran cantidad de biomasa de fitopláncton, pero no necesariamente una gran biodiversidad, ya que se producirá un desarrollo de especies oportunistas, dando lugar a poblaciones muy densas pero formadas por muy pocas especies.

En cambio, el disponer de un agua nitrificada supone disponer de un recurso ya oxidado y que de entrada no ejerce ninguna otra demanda adicional de oxígeno sobre el medio receptor. Al ser aguas sometidas a un elevado grado de oxidación suelen también presentar una baja concentración de sólidos en suspensión y una baja turbidez, que se suelen mantener incluso cuando son almacenadas en lagunas. A diferencia de lo que sucede con las aguas en las cuales el amonio es la especie nitrogenada dominante, esta transparencia del agua suele fomentar el desarrollo de poblaciones de algas filamentosas, que oxigenan toda la columna de agua y que siguen absorbiendo los pocos nutrientes que aún están disueltos. Además, la presencia de oxígeno facilita la aparición y el desarrollo de densas poblaciones de cladóceros, que se alimentan de los pocos sólidos en suspensión que quedan y que confieren al agua una calidad aún superior a la inicial. Es decir, el esfuerzo energético que supone llegar a la nitrificación con respecto al tratamiento convencional de fangos activados queda posteriormente compensado por la cadena de acontecimientos que suceden después, que van en la dirección de mejorar aún más la calidad del agua, de construir redes tróficas a partir de los nutrientes restantes y de permitir la recreación de un ambiente acuático relativamente sano y con un cierto potencial en cuanto a interés ecológico.

La inversión energética en nitrificación es rentable incluso en los casos en los que no se pueda llevar a cabo la desnitrificación en la propia EDAR. Los sistemas de humedales construidos son muy adecuados para llevar a cabo dicha desnitrificación, puesto que suele haber carbono orgánico en abundancia procedente de los restos vegetales como para permitir la actividad bacteriana de la desnitrificación, además de contar con ambientes con concentraciones relativamente bajas de oxígeno disuelto. Excepto en pleno invierno, cuando las bajas temperaturas inactivan el proceso bacteriano de la desnitrificación, los sistemas de humedales construidos consiguen unas muy interesantes eliminaciones de nitrato, además de presentar las ventajas ambientales ligadas a la recreación de los ecosistemas de marismas.

#### *Eliminación de fósforo*

Como elemento clave de la producción primaria, es obvio que cuanto menores sean las concentraciones de fósforo en el agua regenerada, más adecuada será ésta para atender demandas ambientales. Dado que cualquier mejora ambiental finalmente se traduce en un aumento de la biodiversidad, ésta tenderá a ser mayor en los ambientes con menor concentración de nutrientes por la necesidad de mayor especialización que conlleva. En la Costa Brava no se dispone aún de experiencia directa de utilización de aguas regeneradas a las que se les haya eliminado el fósforo, aunque se espera que en breve entre en servicio la que se ha instalado en la ampliación del tratamiento biológico de la EDAR de Empuriabrava. Sin embargo, sí que se ha observado en varias EDAR (Empuriabrava y Pals, especialmente) que en las aguas nitrificadas y desnitrificadas no se observa proliferación alguna de poblaciones de cianobacterias, a pesar de que la relación N/P se encuentra desplazada hasta este segundo elemento. Se desconoce el motivo por el cual ésto sucede, pero las observaciones realizadas hasta el momento indican que para el uso de aguas regeneradas en restauración ambiental, al menos a corto plazo, parece ser más importante la consecución de un efluente nitrificado que no un efluente con una baja concentración de fósforo.

#### *Desinfección*

El agua depurada contiene aún unas concentraciones relativamente elevadas de coliformes fecales, las bacterias comúnmente utilizadas como indicadoras de contaminación fecal. A pesar de que el propio tratamiento biológico suele ya inactivar entre 1 y 2 unidades

logarítmicas, las concentraciones en el efluente secundario suelen estar aún entre las 4 y 6 unidades logarítmicas en 100 ml. Se ha observado que la densidad de las poblaciones de unos organismos filtradores como los cladóceros presenta una relación inversa con las concentraciones de coliformes fecales, de manera que a mayor presencia de cladóceros menor es la concentración de bacterias en el agua (Kampf & Claassen, 2005). Estos autores argumentan también que éste parece ser el principal factor de inactivación de los coliformes fecales en este tipo de ambientes, por encima de lo que serían los factores que hasta ahora se habían tenido por preponderantes, como las variaciones de pH y/o de oxígeno disuelto producidas por la actividad fotosintética de las algas. Aunque muy probablemente las variaciones de estos parámetros sean también un factor de estrés para las poblaciones de coliformes fecales, su efecto parece ser inferior al causado por la predación ejercida por los organismos filtradores.

Ya sea por la presencia de organismos filtradores o por otras causas de estrés ambiental, esta desinfección “natural” puede ser suficiente para la posterior utilización del agua para tareas de recreación o restauración ambiental, dado que las aguas receptoras tienen también una concentración determinada de bacterias indicadoras de contaminación fecal aportadas por la fauna de la zona (Fahrenthold, 2006). En este sentido podría suponer un gasto innecesario el proceder a una desinfección intensa del agua regenerada para después verterla a un entorno en el cual las concentraciones basales serán mayores. En cualquier caso, ante un proyecto en concreto la comparación entre las concentraciones típicas en el agua a reutilizar y las de las aguas receptoras será lo que mejor determinará si es necesario incluir algún tipo de desinfección previa a la reutilización del agua.

## **Criterios de diseño y constructivos**

### *Trampas de sólidos y elementos de control*

Uno de los elementos distintivos de las EDAR, incluso de las que tienen un funcionamiento adecuado, es la relativa variabilidad que pueden presentar en cuanto a la calidad del agua de salida, debido a factores tales como las variaciones en las cargas hidráulicas, en las cargas orgánicas, a las posibles averías y a los posibles vertidos tóxicos que se pueden producir. Es por ello que resulta casi imprescindible el disponer de algún sistema que evite que las aguas con calidades no adecuadas, por ejemplo las que presentan concentraciones excesivas de materia en suspensión, lleguen hasta los sistemas de humedales construidos y, no digamos ya, hasta el ecosistema que se pretende recrear o restaurar.

Lo ideal, sin lugar a dudas, es disponer de sistemas que permitan la retención de sólidos en suspensión, además de elementos de control en línea que activen electroválvulas y cierren el paso hasta las zonas más sensibles ante eventos no deseados. Para la retención de sólidos se pueden utilizar o bien sistemas de filtración, de los cuales existen ya en el mercado tecnologías pensadas para el tratamiento terciario del agua, o bien mediante el paso previo por lagunas de sedimentación. Es importante diseñarlas pensando en cómo proceder para su limpieza una vez sucede alguno de estos eventos no deseados. En cuanto a los elementos de control de la calidad, aparte de una sonda en continuo de nitrógeno amoniacal –que asegure la reutilización de aguas debidamente nitrificadas- es deseable disponer de algún medidor también en continuo de turbidez, como parámetro indicador de la calidad del agua y gracias al cual poder dar una respuesta inmediata ante situaciones indeseadas.

La llegada de aguas con excesivas concentraciones de sólidos en suspensión a un sistema de humedales construidos o al sistema que se pretende restaurar supone un problema de difícil solución y que siempre es mejor intentar prevenir. Dado que los sistemas de humedales son tratamientos extensivos, su elevada superficie hace que los costes de limpieza de este tipo de eventos se disparen; si además se tienen en cuenta las dificultades que puede introducir una meteorología adversa (tener que vaciar y limpiar en períodos lluviosos) y los problemas que pueden derivarse de una descomposición anaeróbica de la materia orgánica, como serían los posibles brotes de botulismo aviar, es obvio que resulta mucho más adecuado invertir el dinero en la mencionada prevención que no en la penosa, costosa e incierta limpieza posterior.

Tanto si en una determinada instalación existen los sistemas de control de la calidad en continuo como si no, será deseable diseñar los humedales construidos de forma que puedan ser fácilmente accesibles para la maquinaria con la que deba realizarse la limpieza (pequeñas retroexcavadoras, remolques, etc.). También es deseable que en la zona de llegada del efluente secundario exista una zona de mayor profundidad y sin vegetación, que atrape los sólidos que en algún momento puedan llegar desde la EDAR, que evite que se esparzan por el resto de superficie del humedal y que permita su fácil recogida mediante camiones cuba.

#### *Líneas de tratamiento en paralelo y vaciado del sistema*

En el caso de sistemas de humedales construidos o de lagunas para el tratamiento de afino del agua depurada es importante que sean diseñados con varias líneas de tratamiento en paralelo. Ello no sólo permite una mejor distribución de las cargas hidráulicas y de nutrientes, sino que además dota al sistema de una muy necesaria flexibilidad operacional, ya que permitirá seguir con el tratamiento del agua en momentos en que pueda ser necesario realizar alguna tarea de mantenimiento en el sistema.

Igualmente es conveniente disponer de válvulas de *by-pass* y/o de vaciado rápido del sistema de humedales o de las lagunas, ante sucesos imprevistos y a veces difícilmente previsibles de antemano. En el sistema de humedales construidos de Empuriabrava, en la Costa Brava, las válvulas de vaciado rápido del sistema han permitido la contención de brotes de botulismo aviar aparecidos de forma inesperada y que de otra manera habrían tenido un impacto superior sobre la avifauna y que habrían resultado mucho más difíciles de erradicar.

#### *Controles de vegetación*

A pesar de que puedan presentar una buena calidad desde el punto de vista de las concentraciones de nutrientes, las aguas regeneradas casi siempre presentarán concentraciones superiores –en mayor o menor grado- a las de las aguas naturales, especialmente por lo que respecta al fósforo. Ello implica que los sistemas extensivos que se utilicen para la mejora de la calidad del agua pueden dar lugar a crecimientos importantes e incluso excesivos de la vegetación, algo que puede ser necesario controlar periódicamente. También es conveniente prestar atención a la posibilidad de colonización de especies invasoras como las lentejas de agua (*Lemna* spp.), que pueden llegara cubrir toda la superficie de las lagunas y de los sistemas de humedales y que, al impedir la fotosíntesis y frenar la difusión de los gases, llevan estos sistemas hacia la anoxia –con todos los potenciales problemas que ello conlleva-. Preveer *a priori* cómo eliminar la lenteja de agua si llega a colonizar estos sistemas puede ahorrar más de un disgusto a los posteriores explotadores del sistema, en el caso que tal situación se llegara a producir.

## **Criterios de potenciación de la biodiversidad**

Aparte de las propias actuaciones de restauración de ecosistemas acuáticos que se puedan realizar, los propios sistemas de afino de la calidad de las aguas depuradas tienen un nada despreciable potencial de mejora de la biodiversidad de una zona. Algunas de las actuaciones que se pueden llevar a cabo para conseguir estas mejoras son las que se describen a continuación.

### *Diversidad de ambientes*

En los sistemas de humedales construidos resulta interesante para la avifauna el disponer de una diversidad de ambientes, ya que cada uno de ellos atraerá a distintas especies de aves. Así, en las zonas de mayor profundidad será habitual encontrar a aves buceadoras, mientras que las zonas más someras serán punto de atracción de aves limícolas. Además, si en los setos que deben delimitar la parcela se plantan especies productoras de bayas como el espino albar (*Crataegus monogyna*) o el endrino (*Prunus spinosa*), éstas atraerán a especies de aves totalmente diferentes a las descritas anteriormente.

### *Posibilidad de regulación de niveles de agua*

Esta posibilidad permitirá seleccionar a determinadas especies en función de los intereses o necesidades de los gestores del sistema. La no previsión de este aspecto puede hacer que determinados esfuerzos de recreación de ecosistemas resulten inviables (p.e., la construcción de lagunas someras como hábitat para limícolas, en caso de la subida de los niveles de agua). En este sentido, aparte de la posibilidad de regular más o menos finamente dichos niveles, hay que tener en cuenta la subida progresiva que se produce por el principio de Arquímedes cuando se produce el gran crecimiento de la vegetación en primavera, así como las oscilaciones que pueden ocasionar las lluvias de fuerte intensidad.

### *Diseño para la protección de especies en peligro*

El disponer de sistemas de este tipo, habitualmente situados en parcelas con perímetros definidos y bajo la supervisión de personal especializado, permite pensar en su utilización para favorecer la reproducción de especies en peligro, como el fartet o las diversas especies de anfibios y de reptiles.

## **Ejemplos de restauración y de recreación de ecosistemas acuáticos mediante el uso de agua regenerada en la Costa Brava**

### *El sistema de humedales construidos de Empuriabrava*

Desde 1998, el efluente secundario nitrificado y desnitrificado de la EDAR de Empuriabrava es tratado en un sistema de humedales construidos pensado específicamente para la reducción adicional de las concentraciones de nutrientes, en especial de nitrógeno. Este sistema de humedales cuenta con tres celdas situadas en paralelo de 160 m x 50 m (8.000 m<sup>2</sup>) cada una, con una profundidad media de 0,5 m, seguidas de una laguna somera de 45.000 m<sup>2</sup> de superficie y de 0,2 m de profundidad media. Las tres celdas tienen una forma alargada, pensada para favorecer la circulación del agua por medio de un flujo en pistón y en ellas el

agua atraviesa tanto zonas cubiertas de macrófitos (básicamente *Phragmites australis* y *Typha latifolia*) como zonas de lámina libre en las que penetra fácilmente la luz del sol. El agua de salida de las tres celdas es recogida en un único registro y de allí es conducida hasta el canal perimetral situado alrededor de la pequeña isla situada en el centro de la laguna, desde donde rebosa hasta el vertedero de salida del sistema situado en uno de los extremos de la laguna (Romero & Sala, 2001; Sala *et al.*, 2004).



Figura 1. Vista general de la EDAR y del sistema de humedales construidos de Empuriabrava.

Tabla 1. Medias aritméticas de las concentraciones de nitrógeno y fósforo y media geométrica de las concentraciones de coliformes fecales correspondientes al año 2005 en la EDAR y sistema de humedales construidos de Empuriabrava. Datos del Consorci de la Costa Brava.

Parámetro	Agua salida decantador secundario	Agua salida EDAR (después lagunas afino) (a)	Agua salida sistema de humedales construidos
Nitrógeno inorgánico, mg N/l	10,6	10,4	4,4
Fósforo soluble, mg P/l	4,3 (b)	3,6	2,0
Coliformes fecales, ufc/100 ml	28.000	240	20

(a) Valores medios del agua que ha entrado en el sistema de humedales (no forman parte de estos cálculos estadísticos los valores de calidad del agua depurada en los momentos en que ha sido vertida al río Muga).

(b) Valor correspondiente a la concentración de fósforo total.

Este sistema de humedales es alimentado con un efluente secundario nitrificado y desnitrificado que presenta unos caudales variables entre los 1.000 m<sup>3</sup>/día en invierno y los 6.000 m<sup>3</sup>/día en verano. Este agua entra en el sistema de humedales sólo si el nitrógeno amoniacal se encuentra por debajo de los 7,5 mg NH<sub>4</sub>-N/l, mientras que de no cumplir con este límite el agua es devuelta al punto original de vertido, que es el tramo final del río Muga. Este límite se fijó inicialmente en 5 mg NH<sub>4</sub>-N/l, pero en 2004 se subió hasta el valor actual ante la evidencia empírica de un buen comportamiento del sistema en cuanto a eliminación de nutrientes. Excepto en el mes de agosto, en el que la EDAR presenta serias limitaciones para

nitrificar todo el efluente secundario que produce, los valores de nitrógeno amoniacal suelen estar muy por debajo de los límites establecidos (entre 1 y 2 mg NH<sub>4</sub>-N/l), por lo que es necesario diferenciar entre el límite definido para el controlar la calidad del agua que entra en el sistema y los valores que realmente presenta el nitrógeno amoniacal en el agua depurada. En 2005 este sistema trató unos 903.000 m<sup>3</sup>, correspondientes a un 82% del total tratado por la EDAR de Empuriabrava y, según los balances disponibles, se estima que eliminó unos 7.000 kg de nitrógeno inorgánico (un 73% de las entradas al sistema) y casi 2.300 kg de fósforo soluble, (un 69% de las entradas) (Consorti de la Costa Brava, 2006a). En cuanto a la inactivación de coliformes fecales, la reducción logarítmica que se produce en el sistema puede llegar hasta casi las 3 unidades, dependiendo de factores tales como: i) la concentración inicial en el efluente secundario; ii) el tiempo de residencia del agua en el sistema, que es mayor fuera de la temporada turística, debido a los menores caudales a tratar; y iii) a la densidad de las poblaciones de organismos filtradores, como por ejemplo los cladóceros. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los valores medios de las concentraciones de nitrógeno, fósforo y coliformes fecales correspondientes al año 2005.



Figuras 2 y 3. Sistema de humedales construidos de Empuriabrava. Izquierda: Vista general de la celda número 1 (19 de mayo de 2006). Derecha: Detalle del aliviadero de salida del sistema (18 de noviembre de 2005).

Una vez tratada, el agua es aprovechada para otros usos ambientales en el ámbito del Parc Natural dels Aiguamolls de l'Empordà, como por ejemplo la alimentación de la laguna de El Cortalet o para el riego de prados húmedos, un ambiente de alto interés ecológico y en fuerte regresión en la zona debido a la transformación del hábitat. Las celdas del sistema de humedales construidos son, a su vez, un hábitat para distintos tipos de aves, como el ánade azulón (*Anas platyrhynchos*), la cerceta común (*Anas crecca*), la focha común (*Fulica atra*) o el zampullín común (*Tachybaptus ruficollis*), entre muchos otros, mientras que la laguna somera, llamada Estany Europa, se ha mostrado como un hábitat adecuado para distintas especies de limícolas, entre las que destacan la cigüeñuela común (*Himantopus himantopus*), el flamenco común (*Phoenicopterus ruber*) o las distintas especies de archibebe (*Tringa* spp.). Tampoco es raro ver ejemplares de aguilucho lagunero (*Circus aeruginosus*) sobrevolar la zona. En cuanto a vegetación, aparte de los macrófitos ya mencionados, es de destacar la colonización espontánea que en los últimos años se ha producido por parte de especies de hidrófitos como *Zannichelia palustris* y *Najas minor*, que forman bellas praderas sumergidas tanto en el fondo de las celdas de tratamiento como de la laguna somera.

### *El Parc de Sa Riera y la riera de Tossa de Mar*

Tossa de Mar es un municipio perteneciente a la zona sur de la Costa Brava, rodeado por montañas y con un innegable atractivo turístico y paisajístico. En 1997, una escuela taller de la zona llevó a cabo un trabajo de reconversión de un antiguo vertedero de escombros adyacente a la EDAR y a la riera de Tossa en lo que actualmente se conoce como el Parc de Sa Riera. Aparte de retirar los escombros de mayor tamaño y de allanar el terreno, se plantaron árboles de ribera, se instaló un sistema de riego subterráneo alimentado con el agua regenerada de la EDAR de este mismo municipio y se construyó una laguna como elemento estético y recreativo de dicho parque. Aparte del positivo cambio paisajístico que se ha producido en la zona con la ganancia de un parque ampliamente disfrutado por la población local, a través de la laguna se ha producido una recarga indirecta de la riera, a la que se le aportan en este tramo unos mínimos pero vitales caudales estivales que permiten la supervivencia de peces como la anguila y que facilitan una más rápida recuperación de las poblaciones de macroinvertebrados –en comparación con los tramos totalmente secos- cuando llegan las lluvias otoñales. Para ampliar la información sobre este proyecto se puede visitar la web <http://www.tossademar.com/ajuntament/mediambient/reutilitzacio/reutilitzacio.htm>.



Figuras 4 y 5. Parc de Sa Riera, en Tossa de Mar (11 de agosto de 2006). Izquierda: Detalle de la zona de vegetación arbórea regada con agua regenerada. Derecha: Detalle de la laguna artificial, también alimentada con agua regenerada.

### **El río Ridaura y la mejora en la gestión de los recursos hídricos en el valle d’Aro**

Hasta el año 1993, toda el agua potable suministrada en el valle d’Aro procedía de pozos ubicados en las inmediaciones del río Ridaura. El acuífero de la zona, con un volumen útil de extracción de 5 hm<sup>3</sup>/año, se había manifestado ya como insuficiente para cubrir la demanda de agua de municipios eminentemente turísticos como Castell-Platja d’Aro, Santa Cristina d’Aro y Sant Feliu de Guíxols, cuya demanda global llega hasta los 10 hm<sup>3</sup>. La entrada en servicio en aquel año del trasvase de agua desde la cuenca del Ter permitió no sólo la mejora del abastecimiento de agua potable, tanto en cantidad como en calidad, sino que también aligeró la presión que soportaba el acuífero de la zona gracias a la reducción de las extracciones de

agua. En 2005 estas extracciones ya representaron sólo el 30% de la demanda total de agua potable, mientras que el 70% restante provino del trasvase de agua del río Ter a la zona.

Sin embargo, ésta no fue la única actuación para la mejora de la gestión de los recursos hídricos en la zona, ya que paralelamente se fue desarrollando un programa de actuaciones de suministro para usos de riego de aguas procedentes de la planta de regeneración de Castell-Platja d'Aro. Así, en 2006 se ha llegado a suministrar casi un total de 1,0 hm<sup>3</sup> de agua regenerada para usos de riego agrícola (maíz, huertas, viveros de plantas ornamentales) y de campos de golf, que de otra forma habrían sido extraídos del acuífero. Estas actuaciones no sólo mantienen el agua en el acuífero –lo cual, a su vez, mejora la garantía del abastecimiento potable en verano-, sino que además reducen de manera importante los vertidos de efluente secundario que recibe el río Ridaura en su tramo final.



Figuras 6 y 7. Imágenes del río Ridaura en Castell-Platja d'Aro. Izquierda: Vista de los caudales naturales, aguas arriba del vertido de la EDAR de Castell-Platja d'Aro (23 de marzo de 2003). Derecha: Vista aguas abajo del vertido de dicha EDAR, en un momento en que toda el agua circulante es efluente secundario (9 de agosto de 2006).

Ambas actuaciones, desarrolladas con todas sus consecuencias a finales de los 90, junto con la recuperación de los valores de pluviometría típicos de la zona en el período 2002-2004, han permitido la restauración de los flujos de caudales naturales en el río Ridaura entre 6 y 9 meses al año, algo que hacía años que no sucedía. El análisis de las poblaciones de macroinvertebrados en distintos puntos del río (cabecera, tramo medio y desembocadura) han revelado una calidad ecológica sorprendentemente elevada para un río que había padecido frecuentes episodios de desecación total aguas arriba del vertido de la EDAR y el propio vertido en su tramo final. Así, mientras que los puntos de cabecera y del tramo medio presentan siempre una categoría máxima del índice IBMWP, excepto en los meses de verano debido a la típica desecación estival, la calidad del punto situado después del vertido de la EDAR es siempre de categoría “buena”, excepto en verano cuando las concentraciones de nutrientes son máximas y no existe dilución con caudales naturales, momento en el que pasa a ser de categoría “mediocre” (Consorci de la Costa Brava, 2006b). Es de esperar que la próxima mejora del tratamiento biológico de la EDAR de Castell-Platja d'Aro, que prevé la incorporación de procesos de nitrificación y desnitrificación, permita la mejora de la calidad ecológica del tramo final del río Ridaura hasta niveles parecidos a los de aguas arriba del vertido.

## Conclusiones

La próxima entrada en vigor de la Directivo Marco del Agua en la UE propiciará necesariamente la aplicación de políticas encaminadas hacia la consecución de elevados estándares ambientales en las masas de agua. Algunas de estas políticas, especialmente en zonas con escasez de recursos o sometidas a períodos de sequía, incluirán con toda probabilidad actuaciones de regeneración y reutilización de aguas, que permitirán una conservación del agua en los ecosistemas y/o una reducción de los vertidos. Los proyectos de este tipo actualmente en funcionamiento en la Costa Brava y otros que pueden existir en otras zonas de España deben convertirse en fuente de información de primera calidad para el desarrollo futuro de proyectos similares con los que seguir avanzando en la protección y mejora de los ecosistemas acuáticos.

## Agradecimientos

Este artículo no habría sido posible sin la colaboración continua y entusiasta de las siguientes personas (en orden alfabético): Daniel Boix (Universidad de Girona), Joan Colom (Empresa Mixta d'Aigües de la Costa Brava, SA), Jordi Couso (Ayuntamiento de Tossa de Mar), Estel Dalmau (Empresa Mixta d'Aigües de la Costa Brava, SA), Josep Espigulé (Parc Natural dels Aiguamolls de l'Empordà), Anna Huguet (Empresa Mixta d'Aigües de la Costa Brava, SA), Maribel Marín (Empresa Mixta d'Aigües de la Costa Brava, SA), Eduard Marquès (Servei de Control de Mosquits de la Badia de Roses i del Baix Ter), Rafael Mujeriego (Universidad Politécnica de Cataluña) Jordi Muñoz (Empresa Mixta d'Aigües de la Costa Brava, SA), Marc Ordeix (Centre d'Estudis dels Rius Mediterranis) Sílvia Quintana (Empresa Mixta d'Aigües de la Costa Brava, SA), Jordi Sala (consultor ambiental), Manel Serra (Consorti de la Costa Brava).

## Referencias

- Consorti de la Costa Brava, 2006a. Datos de explotación del sistema de humedales construidos, año 2005. Información disponible en internet en la dirección [http://www.ccbgi.org/reutilitzacio\\_resum\\_anual.php?id\\_municipi=37&any=2005](http://www.ccbgi.org/reutilitzacio_resum_anual.php?id_municipi=37&any=2005)
- Consorti de la Costa Brava, 2006b. Informe Tècnic: Efecte de la planta de regeneració d'aigua de Castell-Platja d'Aro en la qualitat ecològica, química i microbiològica del riu Ridaura. (En preparació)
- Fahrenthold, D.A. (2006). Wildlife Waste Is Major Water Polluter, Studies Say. Washington Post, 29 septiembre 2006. Disponible en internet en la dirección [http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2006/09/28/AR2006092801994\\_pf.html](http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2006/09/28/AR2006092801994_pf.html)
- Kampf, R. & Claassen, T. (2005). The use of Treated Wastewater for Nature: The Waterharmonica, a Sustainable Solution as an Alternative for Separate Drainage and Treatment. *Proceedings of the 2nd IWA Leading-Edge Conference on Water and Wastewater Treatment Technologies - Prague 2004 and Water Intelligence Online*. IWA Publishing 2005

- Ordeix M., Sala, J., Boix, D., Couso, J. & Sala, L. (2005). The role of integrated resources management in the restoration of Mediterranean temporary streams in the Costa Brava, Catalonia, Spain. Póster presentado en el congreso “*Ecological Restoration: A global challenge*”, Zaragoza, 12-18 Septiembre 2005.
- Romero de Tejada, S. & Sala, L. (2001). *La gestión del agua en el Parc dels Aiguamolls de l’Empordà*. 2ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana, Huelva, 27-28 de Noviembre 2001.
- Sala L., Serra, M., Huguet, A., Colom, J., Carré, M., Romero de Tejada S. and Marquès E. (2004). Multiple benefits of the environmental reuse project at the Aiguamolls de l’Empordà Natural Reserve (Costa Brava, Girona, Spain). *Proceedings of the 9<sup>th</sup> IWA International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*, Volume 2, Avignon, France, 481-489.
- Sala, L., Sala, J., Ordeix, M., Boix, D., Couso, J. & Serra, M. (2005). Les rieres de la Costa Brava: evolució històrica recent, estat actual i perspectives de futur. *Scientia Gerundensis* (en prensa).
- Sala L., Claassen, T., Kampf, R., Sala, J., Boix, D. & Van der Geest, H. (2006). Trophic webs from discharges: Nature enhancement through the Waterharmonica concept. Póster presentado en las Jornadas “*Integrating our approaches to Wetland Science*”, 1st Annual Meeting of the European Chapter of the Society of Wetland Scientists, Bangor, Wales, UK, 5-7 January 2006.
- Velasco Lizcano, Mariano (2001). Hablemos del acuífero 23. Consejería de Obras Públicas de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. 181 páginas.