LA REUTILIZACIÓN PLANIFICADA DE EFLUENTES

Rafael Mujeriego
ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Cataluña
Gran Capitán, D-1; 08034 Barcelona

The main objective of this paper is to discuss the role and the planning process of direct wastewater reuse projects within an integrated system for water resources management, especially in coastal areas of Spain, where seasonal and permanent water shortages are common occurrences. Water reclamation processes and quality guidelines for reclaimed water used for agriculture and landscape irrigation are presented.

INTRODUCCIÓN

La reutilización de efluentes es un componente intrínseco del ciclo natural del agua. Mediante el vertido de efluentes a los cursos de agua y su dilución con el caudal circulante, las aguas residuales han venido siendo reutilizadas incidentalmente en puntos aguas abajo para aprovechamientos urbanos, agrícolas e industriales. La reutilización directa o planificada de agua residual a gran escala tiene un origen más reciente y supone el aprovechamiento directo de efluentes, con un mayor o menor grado de tratamiento previo, mediante su transporte hasta el punto de aprovechamiento 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 directa de agua residual tratada, especialmente en países con recursos hidráulicos suficientes, se ha debido a la necesidad tanto de ampliar sus abastecimientos de agua como de resolver sus vertidos de agua residual. El incremento registrado por las dotaciones de agua de abastecimiento, junto con el aumento de población experimentado por numerosas zonas urbanas, han hecho que las fuentes de abastecimiento tradicionales sean insuficientes para atender las demandas actuales. 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 de aguas residuales tratadas 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 aguas residuales, han hecho que el agua residual tratada se convierta en una fuente alternativa de abastecimiento, económica y segura desde el punto sanitario y ambiental.

El objetivo de esta comunicación es analizar el papel que la reutilización planificada efluentes tiene dentro de una gestión integral de los recursos hidráulicos, especialmente en zonas costeras españolas, caracterizadas por déficits estacionales o permanentes de agua. Los objetivos específicos de esta comunicación son: 1) describir el marco conceptual de la reutilización planificada, 2) analizar los beneficios y las exigencias de la reutilización planificada, 3) describir el proceso de planificación de un proyecto de reutilización planificada, 4) examinar los sistemas de tratamiento comúnmente utilizados para la regeneración de efluentes, 5) presentar las normas y criterios de calidad internacionales para el riego agrícola y de jardinería y 5) analizar el interés de la reutilización del agua en zonas costeras españolas, indicando el valor aproximado de sus costes de construcción, explotación y mantenimiento.

Jornadas Internacionales sobre Aguas Residuales Urbanas e Industriales:
Depuración, Gestión y Reutilización.
Sevilla (España) del 13 al 15 de abril de 1994.

LA REUTILIZACIÓN PLANIFICADA

El proceso de tratamiento necesario para que un agua residual pueda ser reutilizada se denomina generalmente regeneración y el resultado de dicho proceso 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.

La implantación de un proyecto de regeneración de agua tiene dos requisitos esenciales y complementarios: 1) definir los niveles de calidad adecuados para cada uno de los posibles usos que se piense dar al agua y 2) establecer los procesos de tratamiento y los límites de calidad del efluente recomendados para cada uno de los usos previstos. La elaboración y aprobación de estos dos aspectos técnicos de la regeneración de agua 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 y los efectos sobre la salud y el medio ambiente. Prueba de ello son la diversidad y heterogeneidad de criterios y normas de calidad establecidas por diversos países y organizaciones internacionales sobre la reutilización de agua residual (USEPA, 1992; OMS, 1989).

El aprovechamiento de un agua regenerada requiere normalmente: 1) su transporte desde la planta de regeneración hasta el lugar de utilización, 2) su almacenamiento o regulación para adecuar el caudal suministrado por la planta con los caudales consumidos y 3) la definición de unas normas de utilización del agua 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 técnicos suelen formar parte integral de un programa de reutilización planificada de agua residual.

BENEFICIOS DE LA REUTILIZACIÓN PLANIFICADA

El balance hidráulico de una zona geográfica se obtiene como diferencia entre el aporte anual de agua, constituido por las precipitaciones y las aportaciones de los ríos, acuíferos y transvases de otras cuencas, y las pérdidas anuales de agua, o pérdidas irrecuperables, cuyo destino es la atmósfera o el mar. Cualquier actuación destinada a conservar agua que consiga reducir esas pérdidas irrecuperables ha de mejorar la disponibilidad de agua para su aprovechamiento a lo largo del año. Por este motivo, la regeneración y reutilización de agua residual únicamente resultará en un incremento real de los recursos hidráulicos aprovechables en una zona si esas aguas residuales se pierden actualmente de forma irrecuperable, mediante su vertido en el mar desde una población costera o a través de la evapotranspiración en zonas del interior. No obstante, la regeneración y reutilización de agua residual en zonas del interior puede permitir en cualquier caso una gestión más adecuada de los recursos hidráulicos disponibles.

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

1. Una disminución de los costes de tratamiento y de vertido del agua residual. La reutilización de un agua residual ofrecerá una clara ventaja económica cuando las exigencias de calidad de la alternativa de reutilización considerada sean menos restrictivas que las definidas por los objetivos de calidad del medio receptor en el que normalmente se venía realizando el vertido de ese agua residual.

2. 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. La reutilización de agua residual mediante riego permite que las substancias orgánicas difíciles de mineralizar puedan ser degradadas biológicamente durante su infiltración a través del terreno de cultivo, donde sus componentes minerales serán posteriormente asimilados por las plantas.

3. El aplazamiento, la reducción o incluso la supresión de instalaciones adicionales de tratamiento de agua de abastecimiento, con la consiguiente reducción que ello representa tanto de los efectos desfavorables sobre los cursos naturales de agua como de los costes de abastecimiento de agua.

4. Un ahorro energético, al evitar la necesidad de aportes adicionales de agua desde zonas más alejadas a la que se encuentra la planta de regeneración de agua.

5. Un aprovechamiento de los elementos nutritivos contenidos en el agua, especialmente cuando el agua regenerada se utiliza para riego agrícola y de jardinería.

6. Una mayor fiabilidad y regularidad del caudal de agua disponible. El flujo de agua residual es generalmente mucho más fiable que el de la mayoría de los cauces naturales de agua.

EXIGENCIAS DE LA REUTILIZACIÓN PLANIFICADA

Uno de los factores determinantes de la implantación y desarrollo de la reutilización planificada de agua residual es el establecimiento de unas normas de calidad del agua para cada uno de los posibles tipos de aprovechamientos que se contemplen. Entre la gran variedad de substancias que se incorporan a un agua durante su utilización urbana, industrial o agrícola, cabe mencionar las sales disueltas, los elementos nutritivos, los microorganismos patógenos, las substancias inorgánicas tóxicas y bioacumulables y los microcontaminantes orgánicos.

Con objeto de obtener un agua regenerada de la mejor calidad posible, un criterio generalmente adoptado es recurrir a efluentes de carácter urbano, como primera alternativa, dejando los efluentes de tipo industrial sólo para casos excepcionales. Siguiendo este mismo criterio, la reutilización suele plantearse preferentemente con los caudales de aguas brutas que tienen una mayor componente de agua doméstica.

Para asegurar que a la planta de regeneración no llegan contaminantes imprevistos que puedan perjudicar o impedir el proyecto de reutilización, es esencial establecer un riguroso programa de control de vertidos, que incluya desde una ordenanza de vertido hasta un programa de educación ciudadana, todo ello con el fin de evitar la incorporación a la red de saneamiento de compuestos indeseables tanto para la integridad de la propia red de alcantarillado como para el proceso de tratamiento o el proyecto de reutilización.

El transporte de agua regenerada desde la planta de tratamiento hasta el punto de reutilización es una exigencia de cualquier proyecto de reutilización. Esto requiere con frecuencia la construcción de un emisario terrestre y de una doble red de distribución, especialmente cuando se trata de reutilización en zonas urbanas. Por motivos económicos, la implantación de una doble red de distribución suele realizarse de forma progresiva, empezando por los grupos de usuarios con mayor consumo total de agua y extendiéndola después a otras zonas de desarrollo urbano posterior o 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 son las restricciones impuestas al uso del agua, referidas al posible contacto con personas, animales o productos comestibles, mayor es 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 residual sometida únicamente a un tratamiento mecánico destinado a evitar la obturación frecuente de los orificios de salida del agua.

Las autoridades sanitarias dedican 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 morado para las

conducciones y 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 domiciliaria 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.

FIABILIDAD DEL PROCESO DE REGENERACIÓN

Un aspecto característico 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 de agua residual 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 pueda ofrecer, pero, sobre todo, el hecho de que la reutilización de un agua suele conllevar 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 plantas de regeneración de agua residual deba ser elevada y constituya un elemento esencial tanto de su concepción como de su explotación y mantenimiento.

La fiabilidad de los procesos de tratamiento pasa así a constituir un elemento esencial de la concepción y explotación del sistema de reutilización, con prioridad sobre el rendimiento y eficacia de los propios procesos, que han de satisfacer los límites de calidad establecidos para el efluente. Entre las exigencias relativas a la fiabilidad del proceso de regeneración cabe destacar la instalación de controles continuos de determinados parámetros, la instalación de alarmas y automatismos, la disponibilidad de piezas de recambio, la duplicidad de equipos y procesos, la existencia de equipos de entrada en funcionamiento automático en caso de avería, la existencia de volúmenes de reserva de reactivos, especialmente de desinfectante, y la instalación de equipos autogeneradores o la duplicidad de suministros de energía eléctrica.

Para evitar que la utilización de un agua inadecuadamente regenerada pueda provocar un riesgo ambiental y sanitario inaceptable, las normas de regeneración suelen exigir la instalación de lagunas de almacenamiento, donde desviar el efluente inadecuadamente tratado hasta que sea procesado posteriormente, o de un sistema alternativo de vertido.

En definitiva, la regeneración de agua residual se concibe actualmente como un proceso destinado a obtener un producto de calidad. La elaboración y la comercialización 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 explotación de los procesos de regeneración diferente a la adoptada generalmente en el tratamiento de agua residual, cuyo su resultado final suele considerarse un residuo líquido o sólido. Esta nueva forma de plantear la regeneración de agua residual ha hecho que la reutilización planificada de agua residual pase a ser un elemento esencial de la gestión integral de los recursos hidráulicos.

PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS DE REUTILIZACIÓN

La planificación y el análisis adecuados de cualquier proyecto de reutilización de agua permiten asegurar que no lleguen a rechazarse proyectos dignos de ser llevados a la práctica, y que los proyectos que se adopten lleguen a satisfacer los objetivos para los que fueron propuestos. El estudio publicado por Asano y Mills (1990) constituye una síntesis autorizada y reciente sobre este tema, donde se resume la experiencia adquirida durante más de diez años sobre la planificación y el análisis técnico, económico y financiero de los proyectos de reutilización de agua realizados en California. La discusión que aparece a continuación está basada en dicho estudio.

Uno de los conceptos erróneos que con más frecuencia se presentan a la hora de planificar un proyecto de reutilización de agua es el de considerar que el agua regenerada es una fuente alternativa de agua barata. En general, esta hipótesis sólo suele ser correcta cuando las instalaciones de regeneración están situadas en las proximidades de las zonas donde se piensa utilizar el agua y no es necesario realizar ningún tratamiento adicional del efluente disponible. En caso contrario, el coste del sistema de distribución del agua regenerada suele constituir la partida principal del presupuesto del proyecto de reutilización.

Una condición esencial para la planificación adecuada de cualquier proyecto de reutilización es una definición clara de los objetivos que se persiguen. Uno de los principales aspectos a definir desde el primer momento es el alcance del proyecto de reutilización: si tiene un único objetivo prioritario o si se plantea con varios objetivos igualmente prioritarios. En general, los proyectos de reutilización de agua residual se plantean como un medio de lucha contra la contaminación o como un medio de obtener un suministro alternativo de agua. Teniendo en cuenta que la mayoría de los servicios de obras públicas tienen competencias en un solo aspecto del ciclo del agua, la planificación de la mayoría de los proyectos de reutilización suele plantearse con un único objetivo.

En el momento actual, sin embargo, esta concepción tradicional de los proyectos de reutilización, como actuaciones con un único objetivo, está cambiando debido a dos circunstancias concretas: 1) las normas de calidad de los efluentes de agua residual son cada vez más restrictivas y 2) los recursos naturales de agua son cada vez más insuficientes para atender las crecientes demandas de agua. Esta nueva concepción de los proyectos de reutilización, como actuaciones destinadas a satisfacer varios objetivos simultáneamente, ofrece a los planificadores posibilidades adicionales de gestión tales como compartir la responsabilidad y los costes del proyecto, y conseguir un equilibrio óptimo de los beneficios. Este nuevo énfasis en la necesidad de establecer proyectos destinados a satisfacer varios objetivos simultáneamente evidencia lo anticuado que resultan los proyectos establecidos por un único servicio de la administración y bajo un único programa de financiación, por lo que ello puede significar de actuación ineficaz ante las demandas cada vez más complejas de una sociedad preocupada por la calidad ambiental.

Otro aspecto importante a tener en cuenta en la planificación de los proyectos de reutilización de agua es la definición de su zona de influencia. El enfoque tradicional suele consistir en asociar la zona de influencia del proyecto con la zona de competencia del patrocinador del proyecto. En principio, la zona de estudio debería incluir toda el área que pueda beneficiarse de la regeneración y la reutilización del efluente de una determinada planta de tratamiento de agua residual.

La planificación de un proyecto de reutilización de agua consta básicamente de las siguientes etapas:

1. Realizar un estudio de mercado que permita definir la posible demanda de agua residual y las condiciones a cumplir para satisfacer dicho mercado.

2. Evaluar las instalaciones existentes de abastecimiento de agua y de tratamiento de agua residual, con objeto de establecer alternativas preliminares para atender a una parte o al total de dicho mercado, satisfaciendo sus exigencias técnicas y de calidad del agua.

3. Identificar las instalaciones requeridas por las alternativas técnicas que no impliquen la reutilización de agua, tales como plantas de tratamiento con un vertido del efluente en cursos naturales de agua o de embalses de agua de abastecimiento, a fin de disponer de puntos de referencia con los que poder comparar las opciones de regeneración y de reutilización de agua residual.

4. Realizar una primera selección de las alternativas de regeneración de agua, a fin de establecer sus exigencias técnicas, económicas, financieras, de venta del agua regenerada y de cualquier otro tipo, tales como las relativas a la protección sanitaria.

Si un estudio preliminar de viabilidad como el indicado pone de manifiesto que la regeneración y la reutilización de agua residual son factibles y deseables, es posible continuar con la fase posterior de planificación detallada del proyecto, en la que se desarrollen las alternativas detalladas de las instalaciones, llegando así a establecer la propuesta final de las instalaciones que deberán construirse.

Una de las principales tareas de la planificación de un proyecto de regeneración de agua residual es identificar los posibles usuarios que desean y saben como utilizar el agua regenerada. Por otra parte, un proyecto destinado prioritariamente al suministro de agua puede explotarse de forma mucho más flexible si se dispone de un método alternativo para poder verter el caudal de agua que no pueda ser reutilizada en un momento determinado. Entre otras ventajas, esta flexibilidad permite comercializar el agua en régimen de utilización voluntaria por parte de los usuarios. La ejecución de un proyecto de suministro de agua regenerada en régimen de utilización voluntaria exige previamente un conocimiento profundo de la situación del abastecimiento de agua y, especialmente, de la forma en que el agua proveniente de fuentes convencionales compite en calidad, coste y conveniencia con el agua regenerada.

Aunque los factores técnicos, ambientales y sociales son aspectos importantes en la planificación de un proyecto de reutilización de agua, los aspectos económicos suelen ser determinantes a la hora de decidir la puesta en práctica de un proyecto. Los análisis presupuestarios pueden dividirse en dos grandes grupos: análisis económicos y análisis financieros. Aunque ambos términos pueden parecer similares, la distinción entre ambos tipos de análisis tiene una importancia crítica. El objetivo de un análisis económico es establecer las bases sobre las que justificar la viabilidad de un proyecto en términos económicos. Una vez determinada la conveniencia económica de un proyecto, el análisis financiero permite establecer su viabilidad económica.

El patrocinador de un proyecto de regeneración y de reutilización de agua no es el único agente de interés en un análisis financiero. Los futuros usuarios del agua regenerada constituyen así mismo interlocutores de gran importancia. El usuario confía normalmente que el coste del agua regenerada sea inferior al que habría de pagar por un agua proveniente de fuentes de abastecimiento convencionales. Además, un usuario de agua regenerada habrá de sufragar los costes de las modificaciones necesarias para adecuar sus conducciones, o instalar una doble red de distribución, a fin de poder utilizar el agua residual regenerada.

Teniendo en cuenta que la venta de agua residual regenerada puede reducir los beneficios de la venta de agua de abastecimiento, será necesario evaluar los efectos que el proyecto propuesto pueda tener sobre los proveedores de agua de abastecimiento y sobre los precios del agua proveniente de fuentes convencionales. Puede ocurrir que parte de los beneficios de la venta de agua residual regenerada deban destinarse a sufragar las pérdidas de beneficios de los proveedores de agua. Por otra parte, si la disponibilidad de agua regenerada evita el desarrollo y la construcción de nuevas fuentes de abastecimiento de agua mucho más costosas, parecería lógico destinar una parte de los beneficios y de los ahorros conseguidos por los proveedores de agua de abastecimiento a sufragar los costes de los proyectos de regeneración de agua residual.

Los resultados del estudio de planificación deberán reflejarse en un informe final en el que se definan las instalaciones necesarias para la regeneración y reutilización del agua residual. La Tabla 1 contiene un guión de los aspectos más importantes a tener en cuenta en dicho informe. Aunque no todos los aspectos indicados en la Tabla 1 deben ser analizados en profundidad, sí que es necesario que sean tenidos en cuenta. El grado de detalle deberá ser proporcionado al tamaño y a la complejidad del proyecto propuesto. Aunque el énfasis relativo a los aspectos asociados con el suministro de agua residual o con el de agua de abastecimiento dependerán en gran modo de que el proyecto abarque sólo el primero o ambos de esos objetivos, cualquier iniciativa de regeneración y reutilización de agua residual requiere la consideración de ambos aspectos.

Una vez aprobada la propuesta de realización de un proyecto de regeneración y reutilización de agua residual, debe procederse lógicamente a la redacción de los proyectos constructivos de las instalaciones. No obstante, es igualmente importante adoptar las medidas necesarias para asegurar

que los futuros usuarios se comprometen a utilizar el agua regenerada disponible. Hay dos posibilidades a este respecto: el uso obligatorio y el uso voluntario.

Antes de comprometerse a sufragar los presupuestos elevados que representan generalmente los proyectos de regeneración y reutilización de agua, es conveniente asegurarse la participación de los futuros usuarios mediante el establecimiento de acuerdos contractuales. La experiencia ha puesto de manifiesto que, a pesar de que los usuarios potenciales muestran con frecuencia un interés favorable a la utilización de agua regenerada, pueden posteriormente cambiar de parecer, una vez construidas las instalaciones. En resumen, los contratos deberán resolver las preocupaciones del proveedor y del usuario, estableciendo claramente las responsabilidades civiles, financieras y operativas del proyecto.

TIPOS DE REUTILIZACIÓN

El agua residual regenerada se viene empleando para múltiplos usos, entre los que cabe destacar: 1) la reutilización urbana (jardinería, incendios, lavado de calles y automóviles), 2) la reutilización industrial (refrigeración), 3) la reutilización agrícola y forestal, 4) la reutilización ornamental y recreativa, 5) la mejora y preservación del medio natural y 6) la recarga de acuíferos.

La reutilización agrícola y de jardinería constituye el aprovechamiento más extendido del agua residual regenerada, tanto para cultivos hortícolas (consumo crudo) como de cultivos con procesamiento posterior, cereales, cítricos, y viñedos, y tanto mediante riego por aspersión, microaspersión y goteo, como por riego por inundación.

REUTILIZACIÓN EN RIEGO AGRÍCOLA Y DE JARDINERÍA

La reutilización de agua regenerada para riego agrícola y de jardinería es una práctica bien conocida en muchas partes del mundo. No obstante, sólo ha sido durante las últimas décadas cuando la reutilización planificada para riego agrícola y de jardinería en zonas urbanas ha alcanzado una notable aplicación en países desarrollados y con recursos hidráulicos tradicionalmente abundantes.

La publicación en 1984 por el Estado de California del *Manual Práctico de Riego con Agua Residual Municipal Regenerada*, editado en castellano con el patrocinio de la Generalitat de Catalunya y la UPC (Mujeriego, 1990), constituye el punto culminante del proceso de elaboración y puesta a punto de criterios y normas de calidad para el diseño, construcción, mantenimiento y explotación de proyectos de riego con agua residual regenerada. A este trabajo de síntesis habría que añadir los resultados del estudio de demostración patrocinado por el Estado de California, con una duración de 5 años y un presupuesto de 7 millones de dólares, sobre el riego por aspersión con agua residual regenerada de hortalizas de consumo directo, llevado a cabo en la zona agrícola de Monterey, California (Sheikh y col. 1990).

Como complemento de todos estos estudios, la Agencia de Protección Ambiental de los EEUU ha publicado un Manual titulado *Guidelines for Water Reuse* (USEPA, 1992), en el que se ofrecen directrices ampliamente documentadas con las que los servicios municipales o regionales, y los organismos estatales y nacionales puedan promover y desarrollar de forma adecuada y eficaz la reutilización planificada de agua residual. Estas directrices están orientadas principalmente hacia la reutilización planificada en usos urbanos no potables, en usos industriales y en usos agrícolas, sobre los que existe actualmente un gran consenso respecto a la idoneidad de su aplicación. Así mismo, la Water Pollution Control Federation (1989) ha publicado un manual práctico en el que se recogen los aspectos técnicos, económicos y de gestión relativos a la reutilización de agua.

Tabla 1. Principales aspectos a tener en cuenta para definir las instalaciones de un proyecto de regeneración y reutilización de agua residual (Asano y Mills, 1990).

Características de la zona de estudio: geografía, geología, clima, aguas subterráneos, aguas superficiales, usos del suelo y características demográficas.

Características e instalaciones del sistema de abastecimiento de agua en la zona: áreas jurisdiccionales de cada entidad, fuentes y calidades de cada suministro, descripción de las principales instalaciones, tendencias en el consumo de agua, instalaciones necesarias en el futuro, gestión y problemas de las aguas subterráneas, costes presentes y futuros del agua de abastecimiento, subvenciones y precios al consumidor.

Características e instalaciones del sistema de tratamiento de agua residual: áreas jurisdiccionales, descripción de las principales instalaciones, calidad y cantidad del efluente tratado, fluctuaciones horarias y estacionales del caudal y de la calidad del afluente, instalaciones necesarias en el futuro, necesidad de un programa de control de las fuentes de contaminación de aquellos contaminantes que afectan la reutilización, y descripción de los tipos de reutilización que se realiza en la actualidad, identificando los usuarios, los caudales reutilizados y los acuerdos contractuales y régimen de precios actuales.

Niveles de tratamiento exigidos para el vertido y la reutilización, y otras restricciones: normas de protección sanitaria y de calidad del agua, normas de calidad del agua utilizada para cada uso especifico y normas de control aplicables a las zonas de utilización del agua.

Posibles usuarios del agua regenerada: descripción de los métodos de análisis de mercado, inventario de los posibles usuarios del agua y resultados de la encuesta de usuarios.

Análisis de alternativas del proyecto: costes de inversión y costes de explotación y mantenimiento, viabilidad técnica, análisis económicos, análisis financieros, análisis energéticos, efectos sobre la calidad del agua, aceptación del público y del mercado, efectos sobre el régimen de concesiones de agua, efectos sociales y medio-ambientales, análisis comparativo entre alternativas y propuesta de selección, incluyendo aspectos tales como:

- alternativas de tratamiento,
- mercados alternativos, de acuerdo con diferentes niveles de tratamiento y áreas de servicio,
- rutas alternativas de colocación de las tuberías de distribución,
- opciones y localizaciones alternativas para el almacenamiento de agua regenerada,
- alternativas de fuentes convencionales de suministro de agua,
- alternativas de lucha contra la contaminación de las aguas, y
- alternativa de no llevar a cabo el proyecto propuesto.

Plan de acción recomendado: descripción de las instalaciones propuestas, criterios preliminares de diseño, costes previstos, lista de posibles usuarios y compromisos para la utilización del agua, caudales de agua regenerada y variación de la demanda de agua regenerada con respecto a la oferta, fiabilidad del suministro y necesidad de suministros adicionales o de reserva, plan de ejecución de los trabajos y plan de explotación de las instalaciones.

Plan de financiación de las obras y programa económico de la explotación: fuentes y plazos de los recursos destinados al proyecto y construcción de las instalaciones, política de precios del agua regenerada, distribución de costes entre los beneficios relativos al suministro de agua y a las actuaciones de lucha contra la contaminación, previsiones futuras de uso del agua regenerada, precios del agua de abastecimiento, costes del proyecto de regeneración de agua, costes unitarios, precios unitarios, entrada total de capital, subvenciones, costes de depreciación y capacidad de endeudamiento, y análisis de sensibilidad relativo a posibles cambios en las condiciones de partida del proyecto.

Los resultados de estos estudios y demostraciones prácticas han hecho que el riego con agua residual regenerada sea considerado actualmente, tanto en California como en otros Estados del Sur de los EEUU, y en países mediterráneos como Israel, como una alternativa adicional, y en algunos casos como la única disponible, para llevar a cabo una explotación agrícola de regadío o un programa de jardinería urbana. La reutilización de agua para riego de jardinería en zonas urbanas, tanto de uso público como privado, ha pasado a formar parte de la gestión cotidiana de los recursos hidráulicos de numerosos municipios de California, Florida, y otros Estados del sur de los EEUU; del mismo modo, el riego por aspersión de hortalizas de consumo crudo en esos mismos Estados constituye una práctica aceptada tanto por las autoridades sanitarias como por los consumidores, en base a límites de calidad obtenidos y confirmados mediante proyectos de investigación y de demostración, y de sistemas de supervisión del diseño y explotación de las plantas de regeneración, coordinados por las autoridades de recursos hidráulicos, de protección de la calidad del agua y de salud pública (Asano y col., 1990, 1991; D'Angelo, 1993; Paret y Elsner, 1993; Newnham, 1993).

El Manual de Riego con Agua Residual Municipal Regenerada (Mujeriego, 1990) constituye una base de partida de gran utilidad para el diseño y explotación de los proyectos de reutilización de agua regenerada. Al margen de los límites de calidad sanitaria establecidos en California, el Manual ofrece una metodología científica y técnica con la que enfocar posibles proyectos de demostración de reutilización planificada de agua regenerada en otras zonas del mundo, y muy particularmente en zonas costeras e interiores españolas. Esta metodología ha de permitir establecer los límites físicos, químicos y bacteriológicos más apropiados en cada caso. A este respecto, la Generalitat de Catalunya ha patrocinado, junto con la UPC, el Consorcio de la Costa Brava y la Zona Residencial Mas Nou, un estudio de demostración sobre la reutilización de agua regenerada para el riego de campos de golf, que ha permitido definir criterios prácticos para el diseño y la explotación de este tipo de reutilización planificada (Mujeriego y Sala, 1991). Los resultados de este estudio (Mujeriego y cols., 1994) han permitido confirmar la factibilidad y eficacia de los procesos más comúnmente utilizados en California y Florida para la reutilización de agua para riego de jardinería; los resultados económicos de este estudio se presentan en un apartado posterior.

CRITERIOS Y NORMAS DE CALIDAD

Los dos textos de referencia generalmente utilizados por aquellos países que se plantean la reutilización de agua residual son generalmente: 1) las directrices de calidad propuestas por la OMS (1989) para riego agrícola, resumidas en la Tabla 2 y 2) las normas de calidad de California o Florida, incorporadas esencialmente en las recientes directrices propuestas por la USEPA (1992), resumidas en la Tabla 3.

Básicamente, las directrices de la OMS establecen que el agua utilizada para riego agrícola no debe superar 1000 coliformes fecales por 100 ml de agua, mientras que las directrices de la USEPA establecen que no se detecte la presencia de coliformes fecales en 100 ml de agua. Ambas directrices corresponden al caso de riego agrícola y de jardinería sin ninguna restricción de uso, como ocurre durante el riego de productos hortícolas de consumo crudo o el riego por aspersión de un jardín público sin restricción alguna de acceso y uso por parte del público.

España no tiene en estos momentos legislación relativa a la regeneración de agua residual. Una Comisión Interministerial está trabajando sobre un borrador de decreto con objeto de elaborar un texto que sirva de referencia a las iniciativas de reutilización que las sequías están planteando en amplias zonas de España. Impresiones recogidas de varios miembros de dicha Comisión ponen de manifiesto dos tendencias normativas claras: 1) la adopción de una normativa similar a la propuesta por la OMS, tal como han hecho países como Francia (complementadas con restricciones claras en el uso del agua) y 2) la adopción de una normativa similar a la de la USEPA para las propuestas de regeneración que se planteen en el futuro, y la aceptación de unos niveles de calidad similares a los propuestos por la OMS para los proyectos de reutilización que ya estén en funcionamiento.

Al margen del resultado final de este proceso administrativo y reglamentario, creemos que la implantación de un proyecto de reutilización de agua residual regenerada para riego agrícola o de jardinería en zonas agrícolas o urbanas españolas, sin restricción de contacto o acceso del público, debería realizarse atendiendo a las directrices de calidad propuestas por la USEPA. Por otra parte, el riego de cereales y productos sin contacto con el agua de riego podría plantearse con efluentes de un sistema de lagunaje, cuya calidad microbiológica fuera conforme con las recomendaciones propuestas por la OMS.

PROCESOS DE TRATAMIENTO

El proceso de obtención de un agua residual regenerada que satisfaga los criterios de calidad propuestos por la USEPA (1992) para el riego de jardinería de zonas públicas sin ningún tipo de restricción en cuanto a exposición y 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 hipotecar o impedir la reutilización del agua regenerada.

2. Un tratamiento biológico secundario capaz de producir un efluente con un contenido de materia en suspensión inferior a 10-20 mg/l y valores comparables de DBO_5.

3. Un tratamiento terciario destinado a eliminar la materia en suspensión del afluente secundario, mediante una filtración directa, y a desinfectar completamente el efluente. Este proceso de tratamiento constituye propiamente la fase de regeneración del agua residual.

4. Un depósito regulador de los caudales de agua regenerada, a fin de adecuar la producción de la planta a la demanda de uso y asegurar una cierta reserva de agua regenerada.

Los extensos trabajos de experimentación y de seguimiento de las numerosas instalaciones de regeneración de agua residual existentes en California y Florida ponen de manifiesto que un buen efluente biológico secundario, filtrado mediante un filtro de arena, o de arena y carbón, con la eventual adición de unos miligramos por litro de coagulante (alúmina, generalmente), y una desinfección con cloro con un tiempo de contacto de entre 30 minutos (Florida) y 2 horas (California), hasta alcanzar la eliminación de coliformes, permite obtener un agua regenerada desprovista de virus y bacterias patógenas, y por lo tanto, ofrece una garantía de calidad similar a la de un agua potable de consumo público (Asano y col., 1990).

El grado de automatización de las plantas de regeneración de agua existentes es muy variado, pero exige en todos los casos un buen seguimiento del proceso de tratamiento biológico (mediante muestreos integrados diarios, como mínimo), un control continuo de la turbiedad del efluente secundario y del efluente filtrado (que suele situarse por debajo de 1 UNT) y de la concentración de desinfectante al término del proceso de desinfección, y un análisis diario de coliformes, sobre muestra integrada obtenida a la salida del proceso de desinfección.

En general, las plantas de regeneración de agua a partir de efluentes municipales y destinadas 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 insuficiente calidad pueda salir de la planta de regeneración. Generalmente, los municipios son los encargados de la distribución y gestión del agua regenerada que pasa así a constituir un nuevo servicio público de calidad. La coordinación y comunicación con los usuarios, tanto individuales como colectivos (urbanizaciones, campos de golf), es muy directa y cordial, a fin de detectar cualquier posible incidente y de disipar cualquier duda que pueda surgir.

Tabla 2. Directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales utilizadas en agricultura (OMS, 1989).

Categoría	Condiciones del aprovechamiento	Grupo expuesto	Nematodos intestinales huevos/litro (b)	Coliformes fecales UFC/100 ml (c)	Tratamiento necesario para lograr la calidad microbiológica exigida
A	Riego de cultivos que comúnmente se consumen crudos, campos de deporte, parques públicos (d)	Trabajadores, consumidores públicos	≤ 1	≤ 1000	Serie de lagunas de estabilización que permitan lograr la calidad microbiológica indicada, o un tratamiento equivalente
B	Riego de cultivos de cereales industriales y forrajeros, praderas y árboles (e)	Trabajadores	≤ 1	No se recomienda ninguna norma	Estancia en lagunas de estabilización durante 8-10 días, o tratamiento con una eliminación equivalente de helmintos y coliformes fecales
C	Riego localizado de los cultivos indicados en la categoría B, cuando ni los trabajadores ni el público estén expuestos	Ninguno	No es aplicable	No es aplicable	Tratamiento previo de acuerdo con las exigencias de la técnica de riego, incluyendo al menos una sedimentación primaria

a) Deberán tenerse en cuenta las condiciones epidemiológicas, socioculturales y ambientales de cada caso concreto, modificando las directrices en consonancia.
b) Media aritmética. Especies de *Ascaris*, *Trichuris* y anquilostomas.
c) Media geométrica. Durante el período de riego.
d) Conviene establecer una directriz más estricta (≤ 200 coliformes fecales/100 ml) para prados de uso público, como los existentes en los hoteles, en los que el público puede entrar en contacto directo con el agua depositada en la hierba.
e) En el caso de árboles frutales, el riego debe interrumpirse dos semanas antes de iniciar la recolección de la fruta, debiendo estar prohibido la recogida de la fruta que haya caído al suelo. No es conveniente regar por aspersión.

Tabla 3. Directrices recomendadas para la reutilización de agua en zonas urbanas por la Agencia de Medio Ambiente de los EEUU (USEPA/AID, 1992).

Tipos de reutilización	Nivel de tratamiento (a)	Calidad agua regenerada (b, c, d, e)	Vigilancia del agua regenerada	Distancia de protección
Todo tipo de riego de jardinería, como campos de golf, parques, cementerios, así como lavado de automóviles, suministro de urinarios, sistemas de lucha contra incendios y de refrigeración de aire acondicionado, y cualquier otro uso con un grado similar de exposición y acceso del público al agua.	Secundario Filtración Desinfección	pH = 6 - 9 < 10 mg/l DBO < 2 UNT Coliformes fecales no detectables en 100 ml 1 mg/l Cloro residual	pH: semanal DBO: semanal Turbiedad: en continuo Coliformes: diario Cloro residual: en continuo	15 m de los pozos de agua de abastecimiento público

a) En áreas de riego con acceso controlado, en las que las precauciones de diseño y explotación reducen significativamente las posibilidades de contacto del público con el agua regenerada, puede ser apropiado un nivel de tratamiento menor, tal como tratamiento secundario y desinfección, de modo que no se supere 14 coliformes fecales/100 ml.
b) El agua regenerada no debe contener niveles detectables de microorganismos patógenos.
c) El agua regenerada deberá ser transparente, inodora y no deberá contener substancias tóxicas en caso de ingestión.
d) Puede ser necesario un nivel de cloro, o un tiempo de contacto, superior a fin de asegurar que los virus y los parásitos son efectivamente inactivados o destruidos.
e) Se recomienda un nivel de cloro residual igual o superior a 0,5 mg/l en la red de distribución a fin de reducir los olores, el crecimiento de película biológica y la reactivación microbiana.

LA 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 consumos domésticos asociados con un considerable nivel de calidad de vida como para atender las demandas de una creciente extensión de zonas ajardinadas y agrícolas que sirven de marco lúdico y comercial para esas mismas zonas costeras. La gestión de los recursos hidráulicos en esas condiciones plantea dos líneas de actuación complementarias: de una parte, la utilización racional del agua, evitando los consumos excesivos, y de otra parte, la reutilización de agua residual para usos no potables, especialmente la jardinería y la agricultura, permitiendo la creación neta de nuevas dotaciones de agua y evitando el deterioro de las aguas costeras. Entre las formas de actuación más apropiadas a cada una de las actuaciones anteriores cabe citar, de una parte, la educación e información ciudadana, la reglamentación y las tarifas progresivas y, de otra parte, la regeneración y reutilización de efluentes de agua residual.

Las zonas costeras españolas se caracterizan por el relativo ajuste entre las mayores producciones de agua residual que se registra durante la temporada estival y la máxima demanda de agua para

riego agrícola y de jardinería que se produce en esa misma estación. Al margen de las exigencias técnicas y financieras que esas demandas estacionales plantean, tanto en el sistema de abastecimiento de agua como en el de tratamiento y vertido de agua residual, la reutilización de agua residual en zonas costeras ofrece claras ventajas económicas y ambientales en sus diversas alternativas: 1) riego de jardinería, con lo que ello 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 interés y 3) recarga de acuíferos costeros y de zonas húmedas, como forma de protección de recursos naturales de gran atractivo y valor ambiental.

Aunque la reutilización de agua residual en zonas del interior no permite la creación neta de nuevos recursos hidráulicos, sí ofrece la posibilidad de una mejor gestión del agua, mediante la sustitución de agua potable de consumo público por agua residual regenerada para aquellos usos en que no sea necesario agua potable. Hay que señalar por último que una instalación de regeneración de agua residual destinada al riego agrícola y de jardinería de una zona turística española pasaría a convertirse en un estandarte tecnológico y de prestigio de primera magnitud en todo el sur de Europa y la región mediterránea, y le conferiría una posición de vanguardia en esta faceta tan importante de la gestión de los recursos hidráulicos.

COSTES DE EXPLOTACIÓN Y MANTENIMIENTO

La escasez de instalaciones de regeneración de agua residual en zonas de características socio-económicas como las españolas no permite ofrecer estimaciones precisas de sus costes de explotación y mantenimiento. Como referencia de interés citaremos las estimaciones obtenidas en el proyecto de demostración de riego de campos de golf con agua regenerada (Mujeriego y cols., 1994) donde el coste de desinfección con hipoclorito de un efluente biológico decantado es de 6 ptas/m^3, y el ahorro por aporte de fertilizantes alcanza 14 ptas/m^3. Por otra parte, el presupuesto de construcción de una planta de regeneración de dicho efluente secundario (filtración con arena y desinfección con hipoclorito) y con capacidad mínima estimada de 3000 m^3/día se sitúa en 30 millones de pesetas, con un coste de estimado de reactivos de coagulación-floculación y de energía eléctrica de 3,5 ptas/m^3. Obviamente, tanto los costes anuales de amortización como los de explotación y mantenimiento variarán en función de las demandas de agua, constituidas fundamentalmente por el riego de un campo de golf y de diversas cultivos de huerta.

CONCLUSIONES

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

1. La reutilización planificada de agua residual se ha convertido en un componente esencial de la gestión integral de los recursos hidráulicos, especialmente en zonas costeras, donde puede contribuir de forma significativa al aumento neto de dichos recursos, tanto para su utilización directa como a través de su purificación y almacenamiento en acuíferos costeros.

2. Aunque los criterios y normas de calidad establecidos para diferentes usos del agua regenerada son variados y heterogéneos, se dispone de experiencia suficiente para planificar, proyectar y explotar sistemas de reutilización de agua residual económicos y seguros, tanto desde el punto de vista sanitario como ambiental.

3. La regeneración de agua residual se concibe actualmente como un proceso destinado a obtener un producto de calidad. La elaboración y comercialización de este producto debe plantearse en un marco más amplio que el tradicional de lucha contra la contaminación, y con una nueva mentalidad en la planificación, concepción y explotación de los procesos de regeneración diferente a la adoptada generalmente en el tratamiento de agua residual.

4. La planificación adecuada de cualquier proyecto de reutilización requiere una definición clara de sus objetivos. Tradicionalmente, la reutilización se ha planteado como un medio

de lucha contra la contaminación o bien como un medio de aumentar el suministro de agua.

5. La concepción actual de los proyectos de reutilización exige una coordinación institucional, reglamentaria, financiera, de ámbito geográfico de influencia y técnica, tanto durante la construcción como la explotación y mantenimiento, en un grado muy superior a la empleada tradicionalmente en la gestión de los recursos hidráulicos.

6. La utilización de agua residual regenerada para riego agrícola y de jardinería ofrece una alternativa práctica de gran interés para el tratamiento y vertido del agua residual.

7. Los proyectos de demostración de los diferentes tipos de reutilización planificada de agua residual contribuyen al desarrollo y aceptación de estas técnicas, permitiendo comprobar su capacidad para aportar recursos hidráulicos, reciclar elementos nutritivos y asegurar la calidad sanitaria y ambiental.

8. El riego agrícola y de jardinería con agua residual regenerada en España debería plantearse en base a unas normas de calidad similares a las propuestas por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los EEUU, consistentes básicamente en un agua de gran transparencia y bien desinfectada. El riego de productos sin contacto directo con el agua, y con restricciones de acceso al público, podría plantearse en base a unas normas de calidad similares a las propuestas por la Organización Mundial de la Salud, mediante la reutilización de efluente de un sistema de lagunaje.

9. La implantación de un proyecto de reutilización planificada de efluentes en cualquier zona española pasaría a convertirse en un estandarte tecnológico y de prestigio de primera magnitud en todo el sur de Europa y la región mediterránea, y le conferiría una posición de vanguardia en esta faceta tan importante de la gestión de los recursos hidráulicos.

REFERENCIAS

Asano, T., D. Richard, R.W. Crites y G. Tchobanoglous (1991). Evolution of tertiary treatment requirements in California. *Water Environment and Technology*. vol. 4, no. 2.

Asano, T. y R.A. Mills (1990). Planning and Analysis for Water Reuse Projects. *Journal of the American Water Works Association*. Enero de 1990.

D'Angelo, S. (1993). Reusing water in the nineties. *Water Environment and Technology,* vol 5, no. 2.

Mujeriego, R. (Editor) (1990). *Manual Práctico de Riego con Agua Residual Municipal Regenerada*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Mujeriego, R. y L. Sala (1991). Golf course irrigation with reclaimed wastewater. *Wastewater reclamation and reuse*. Water Science and Technology, vol. 24, no. 9. International Association on Water Pollution Research and Control, Pergamon Press.

Mujeriego, R., L. Sala, J. García y M. Carbó (1994). Gestión del Agua Residual Regenerada Utilizada para Regar el Campo de Golf Mas Nou. Cuarta Memoria Semestral e Informe Final. Junta de Sanejament de la Generalitat de Catalunya. Barcelona.

Paret, M. y M. Elsner (1993). Reclaimed water perspectives. *Water Environment and Technology,* vol 5, no. 2.

Newnham, D.F. (1993). Dual distribution systems. *Water Environment and Technology,* vol 5, no. 2.

Organización Mundial de la Salud (1989). *Directrices Sanitarias sobre el Uso de Aguas Residuales en Agricultura y Acuicultura*. Serie de informes técnicos 778. Ginebra, Suiza.

Sheikh, B., R.P. Cort, W.R. Kirkpratick, R.S. Jaques and T. Asano (1990). Monterey Wastewater Reclamation Study for Agriculture. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation*, volumen 62, número 3.

United States Environmental Protection Agency and United States Agency for International Development (1992). Manual on *Guidelines for Water Reuse.* EPA/625/R-92/004, September 1992. Center for Environmental Research Information, Cincinnati, Ohio.

Water Pollution Control Federation (1989). *Water Reuse (Second Edition)*. Manual of Practice SM-13. Virginia, Estados Unidos.