



LAS RECUPERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES COMO NUEVO RECURSO HÍDRICO

Takashi Asano

Profesor adjunto

Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental

University of California at Davis

Davis, CA 95616, USA

ABSTRACT (RESUMEN)

En este estudio se examina el papel que tiene la reutilización de las aguas residuales en el contexto de la gestión de recursos hídricos. Durante los últimos decenios, el uso del agua ha aumentado de manera rápida y significativa. Sin embargo, las frecuentes sequías, los costes incésantes del desarrollo hídrico, las preocupaciones institucionales y medioambientales, y una creciente filosofía conservacionista, constituyen factores clave para explicar el auge actual del interés por la recuperación y reutilización de las aguas residuales. El agua recuperada es, al fin y al cabo, un recurso hídrico que existe en el mismo umbral del entorno urbano donde los recursos hídricos más se necesitan y tienen un precio más caro. Además, el agua recuperada suministra una fuente de agua fiable incluso en los años de sequía, ya que la generación de aguas residuales urbanas se ve muy poco afectada por la sequía.

En esta ponencia, se desarrollan los conceptos fundamentales de la recuperación y reutilización de las aguas residuales, incluyendo las categorías de reutilización del agua, los métodos para la planificación, y la economía de la reutilización del agua, subrayando la integración de esta fuente alternativa en la planificación de los recursos hídricos. En toda operación de recuperación y reutilización hídrica, existe algún riesgo de afección humana a diversos agentes infecciosos. A causa de este peligro, se le presta una especial atención a los sistemas de tratamiento de aguas residuales terciarios/avanzados que producen aguas residuales prácticamente libres de patógenos para aplicarlas sobre una multitud de usos beneficiosos, tales como el sistema dual de desagüe/distribución en los grandes complejos comerciales, el riego de parques, patios escolares y campos de golf, y la recarga del agua del subsuelo. Se explican brevemente los aspectos reguladores de la reutilización del agua, además de los costes por la recuperación de las aguas residuales. La ponencia también repasa la aparición de sistemas modernos de recuperación de aguas residuales y de reutilización, que van desde el agua residual al agua recuperada y llegan hasta el agua repurificada, y se centra en la evaluación de los acontecimientos más significativos acaecidos en la tecnología y la ingeniería de la recuperación de las aguas residuales.

Palabras clave: Aguas residuales, recuperación, reutilización, Salud Pública, criterios, estándar, calidad del agua, reutilización planificada, reutilización no planificada, reutilización indirecta, patógenos, riesgos sanitarios.

INTRODUCCIÓN

Durante el último cuarto de siglo, se ha propuesto repetidamente la tesis de que el tratamiento avanzado de las aguas residuales municipales e industriales proporciona unas aguas tratadas de tanta calidad que no deberían desperdiciarse, sino destinar-

se a fines provechosos. Esta convicción, junto con la escasez cada vez mayor de agua y los problemas de protección medioambientales, proporciona un marco realista para considerar la recuperación y la reutilización de las aguas residuales en muchas partes del mundo. Las aplicaciones que tiene la reutilización del agua no-potable, como son el riego agrí-

cola o de jardines, el abastecimiento para los servicios higiénicos de los grandes complejos comerciales, y el agua para fines estéticos o medioambientales, se han convertido en las principales opciones para una reutilización planificada del agua.

La reutilización del agua es un elemento del desarrollo y la gestión de los recursos hídricos que proporciona opciones innovadoras y alternativas para la agricultura, el abastecimiento municipal y la industria. Los esfuerzos que se han dedicado en muchos países para controlar la contaminación del agua han conseguido poner a nuestra disposición aguas residuales tratadas que pueden suponer un mayor ahorro para el suministro actual existente si se compara con el desarrollo de nuevos recursos hídricos cada vez más caros y ecológicamente destructivos. Sin embargo, la reutilización del agua es tan sólo una de las alternativas a la planificación que ha de hacer frente a las necesidades futuras de recursos hídricos. La conservación del agua, su reciclado, la gestión y el uso eficaces de los suministros de agua existentes, y el nuevo desarrollo de recursos hídricos basado en la gestión de las cuencas, constituyen ejemplos de otras alternativas.

La reutilización del agua supone tomar medidas sobre la salud pública y también requiere un estudio profundo de planificación de la infraestructura y de los recursos, el emplazamiento de la planta de tratamiento de las aguas residuales, la fiabilidad del tratamiento, el análisis económico y financiero, y una gestión del uso del agua que suponga una integración del agua recuperada con otro tipo de agua no recuperada. La posibilidad de un uso adecuado de las aguas residuales depende de algunas consideraciones económicas que han sido objeto de estudio, de sus usos potenciales, del rigor de los requisitos para el vertido de aguas residuales y la política pública en que prevalezca el deseo de conservar y de no desarrollar los recursos hídricos existentes frente a las consideraciones económicas y sanitarias. Hoy día, existen tratamientos técnicamente probados o procesos de purificación capaces de suministrar agua de casi cualquier calidad que se desee. Así, la reutilización de las aguas residuales tiene su propio lugar y desempeña un papel importante a la hora de hacer una óptima planificación y una gestión y un uso más eficientes de los recursos hídricos en muchos países.

Aunque el suministro del agua en EE.UU., en términos generales, es suficiente para cubrir las necesidades para toda clase de aprovechamiento, en ciertas zonas o regiones se viven mayores problemas de suministro de agua. Tales problemas incluyen la escasez de agua a consecuencia de unos defectuosos sistemas de distribución, sobreexplotación de acuíferos y degradación de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas (*US Water Resources Coun-*

cil, 1978). Al aumentar la demanda de agua, la recuperación y la reutilización de las aguas residuales se han convertido en una fuente cada vez más importante para cubrir una parte de esta demanda. Puesto que la recuperación del agua y la reutilización planificada de las aguas residuales tratadas están estrechamente unidas al suministro de agua potable en cada región, los proyectos importantes para la reutilización hídrica se ponen en práctica en áreas que padecen carestía de agua además de aquellas zonas con elevada demanda de agua, como pueden ser las grandes áreas metropolitanas. A través de la planificación integrada de recursos hídricos, el uso del agua recuperada puede proporcionar una flexibilidad suficiente que permita a una agencia de gestión del agua responder a las necesidades a corto plazo, además de aumentar la fiabilidad del suministro hídrico a largo plazo, sin tener que construir medios de almacenamiento o transporte adicionales, que representarían un coste económico y medioambiental importante.

Es más, la reutilización del agua reduce simultáneamente la contaminación al ofrecer la posibilidad de limitar el vertido en las aguas de superficie interiores y en el entorno marítimo. El reconocimiento de la protección sanitaria en las playas y de las condiciones ecológicamente sensibles en las aguas costeras, por ejemplo las de la Costa Blanca y la Costa del Sol, de la Florida occidental y el sur de California, puede hacer necesario que se establezcan límites estrictos sobre el vertido o la casi prohibición del vertido de aguas residuales tratadas. El mayor y más estricto rigor de los límites de vertidos, ha hecho que muchas comunidades, como por ejemplo Limassol, Chipre y San Diego (California), hayan puesto en práctica la recuperación y la reutilización de las aguas residuales en los últimos tiempos.

La *recuperación de las aguas residuales* es el tratamiento o proceso que sufren las aguas residuales para poder ser reutilizadas, y la *reutilización del agua* es el uso de las aguas residuales tratadas con fines beneficiosos, como el riego agrícola y la refrigeración industrial. Además, la reutilización *directa* de las aguas residuales requiere la existencia de tuberías u otros medios de conducción para la distribución del agua recuperada. La reutilización *indirecta*, a través del vertido de efluentes residuales en un agua receptora, para su asimilación y retirada aguas abajo, se considera como importante pero no constituye un sistema de reutilización *directa y planificada* de las aguas. Al contrario de lo que ocurre con la reutilización directa del agua, el reciclado del agua normalmente supone un sólo uso o usuario y sus efluentes se recogen y son devueltos para el mismo plan de utilización. En este contexto el reciclado del agua se practica principalmente en la industria, por

ejemplo de la celulosa y del papel (Metcalf & Eddy, 1991).

LAS CATEGORÍAS DE LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

En la planificación y la ejecución tanto de la recuperación como la reutilización de las aguas residuales, son las aplicaciones que se persiguen para la reutilización de las aguas residuales las que imponen el grado necesario de tratamiento de las aguas residuales y la fiabilidad del proceso y operación del tratamiento de dichas aguas residuales. En principio, las aguas residuales o cualquier agua de calidad marginal pueden utilizarse para cualquier fin siempre que sean tratadas de manera que cumplan los requisitos de calidad hídrica para el uso al que se destinen. En la *tabla 1* se identifican siete categorías de reutilización de aguas residuales municipales, junto con sus potenciales limitaciones. Se pueden utilizar grandes cantidades de aguas residuales municipales recuperadas en cuatro categorías principales de reutilización: el riego agrícola, el riego de jardines, el reciclado y reutilización industriales y la renovación de las aguas del subsuelo.

En California, donde se han desarrollado el mayor número de instalaciones de recuperación y reutilización de aguas residuales, se consumen en la actualidad al menos 330 millones de m³ para su aprovechamiento. Esta cifra equivale a cerca del 8% de las aguas residuales municipales generadas en el Estado de California, en 1990. Según el único estudio nacional disponible sobre los proyectos de recuperación y reutilización de aguas residuales, en 1975 existían 536 proyectos para la reutilización de las aguas residuales en Estados Unidos. El volumen total estimado de reutilización de aguas residuales era de 2.6×10^{12} m³/día (Metcalf & Eddy, 1991). Una cantidad considerablemente mayor de agua recuperada ha sido utilizada a nivel nacional desde 1975, pero por desgracia, no existe ningún resumen nacional de tales datos.

El riego agrícola y de jardines supone el mayor uso actual y en proyecto de las aguas residuales recuperadas en Estados Unidos. Los usos para el riego pueden ofrecer una oportunidad importante para reutilizar las aguas residuales ya que, en muchas regiones áridas y semi-áridas, entre un 70 y un 90% del agua aplicada se usa para el riego. Gran parte de la atención dedicada al agua recuperada durante la última década ha sido para que se destine al medio urbano, por ejemplo el riego de jardines, y su empleo potencial para la renovación del agua del subsuelo. Sin embargo, la aplicación histórica para fines agrícolas sigue predominando en California, por ejemplo, sumando un 63% del total de agua recuperada empleada en 1987. Al menos 20 cosechas

diferentes se han regado con aguas recuperadas, además de, por lo menos, 11 cosechas adicionales de productos de invernadero.

En California, la aplicación industrial donde más se ha utilizado el agua recuperada ha sido en la fabricación de papel. Otras aplicaciones industriales de importancia ha sido la refrigeración de las centrales térmicas, el riego de balsas de transporte de troncos y la refrigeración de altos hornos (State of California, 1990).

ELEMENTOS DE PLANIFICACIÓN PARA LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA

A continuación, se caracterizan las tendencias y factores que incitan a la recuperación y reutilización de las aguas residuales:

- * La disminución de la contaminación del agua de las aguas receptoras.
- * La disponibilidad de aguas residuales altamente tratadas para varios aprovechamientos, a causa de los estrictos requisitos de control de la contaminación del agua.
- * Disponer de un suministro fiable de agua a largo plazo en las comunidades circundantes.
- * La demanda de agua y la gestión contra las sequías en la planificación general de los recursos hídricos.
- * Una política pública que fomente la conservación del agua y la reutilización de las aguas residuales.

Un primer paso en la planificación para reutilizar el agua supone determinar cuándo un proyecto de reutilización de aguas residuales se destinará principalmente al suministro de agua o al control de la contaminación hídrica. El papel que desempeñan las aguas residuales recuperadas en la planificación de los recursos hídricos ha adquirido una mayor importancia en los últimos diez años. Con frecuencia, las demandas de agua sobrepasan a los suministros de agua más fiables, incluso en años de precipitaciones normales, y el desarrollo de nuevos recursos hídricos resulta cada vez más costoso y prohibitivo por razones medioambientales. El agua recuperada, a fin de cuentas, es un recurso hídrico que existe en el mismo umbral del entorno urbano y una fuente segura de agua, incluso en años de sequía, capaz de sustituir los suministros de agua potable para otros usos no potables y sub-potables.

La planificación para la reutilización del agua suele desarrollarse en tres etapas:

- * La planificación conceptual.
- * La investigación sobre su viabilidad.
- * La planificación de las instalaciones.

TABLA 1
CATEGORÍAS EN LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES Y SUS
POTENCIALES LIMITACIONES**

<i>Categorías</i>	<i>Limitaciones potenciales</i>
Riego agrícola: cosechas y viveros comerciales	Efectos sobre la calidad del agua: sales en suelos y cosechas.
Riego de parques y jardines: parques zonas recreativas escolares setos centrales autovías campos de golf cementeros cinturón verde residencial	Cuestiones sanitarias relativas a los patógenos: bacterias, virus y parásitos. Contaminación aguas superficiales y subterráneas por deficiente tratamiento. Posibilidad de venta de la cosecha y aceptación pública.
Reutilización industrial: refrigeración alimentación calefacciones agua para los procesos construcción pesada	Constituyentes del agua recuperada relacionados con la acumulación de cal, la corrosión, el desarrollo biológico y las incrustaciones. Cuestiones sanitarias sobre transmisión por aerosol de orgánicos y patógenos en agua para refrigeración y patógenos en aguas para los diferentes procesos.
Recarga de acuíferos: reposición agua subterránea intrusión de agua salada control de hundimientos	Restos orgánicos en aguas recuperadas y sus consecuencias toxicológicas. Total de sólidos disueltos, metales y patógenos en aguas recuperadas.
Usos para ocio y medio ambiente: lagos y estanques embellecimiento de pantanos aumento caudal para pesca nieve artificial	Cuestiones sanitarias relativas a virus y bacterias. Eutroficación debida a nutrientes. Cuestiones estéticas que incluyen olores.
Usos urbanos no-potables: protección contra incendios aire acondicionado retretes	Cuestiones de salud pública relativas a la transmisión de patógenos por aerosol. Efectos de la calidad del agua en la acumulación de cal, la corrosión, el desarrollo biológico y las incrustaciones. Posibles interconexiones con sistemas de agua potable.
Reutilización potable (agua purificada): mezcla con el suministro de agua suministro de agua de tubería a tubería	Cuestiones estéticas y de aceptación pública. Cuestiones de salud pública por la transmisión patógena, incluidos los virus.

** Ordenado según volumen de uso decreciente.

Durante la planificación, se esboza un posible proyecto, se calculan los costes aproximados, y se identifica un mercado potencial para el agua recuperada. Si el concepto parece válido, se realiza un estudio inicial sobre su viabilidad.

La investigación inicial sobre la viabilidad consiste en: (1) llevar a cabo una evaluación de mercado para las aguas residuales recuperadas, (2) evaluar el suministro de agua existente y las instalaciones de aguas residuales y desarrollar algunas alternativas preliminares, (3) desarrollar o identificar las instalaciones alternativas que no implican la recuperación, por ejemplo el tratamiento de aguas residuales para su vertido en cauces o la construcción de presas y embalses para un suministro de agua en el futuro, con las que poder comparar con una determinada propuesta de reutilización del agua, y (4) realizar un análisis inicial de las alternativas de reutilización de las aguas residuales con que considerar sus atractivos técnicos, económicos y financieros, y otras limitaciones como la protección de la salud pública. (Asano y Mills, 1990).

Si, sobre la base de este estudio inicial de viabilidad, la recuperación y reutilización de las aguas residuales parece factible, se puede emprender, entonces, la planificación real detallada, el desarrollo más profundo de las instalaciones alternativas y la propuesta de un proyecto final de instalaciones. Una tarea clave a la hora de planificar un proyecto de recuperación hídrica es hallar clientes potenciales que quieran y sepan utilizar las aguas residuales recuperadas para sus aplicaciones. El que un usuario pueda utilizar las aguas residuales recuperadas depende de la calidad de las aguas residuales disponibles y de su idoneidad para el tipo de uso en cuestión.

Aunque en el momento de planificar los proyectos se tengan en cuenta los factores técnicos, medioambientales y sociales, los factores económicos suelen prevalecer sobre otras cuestiones al tomarse decisiones sobre la conveniencia de poner en marcha un proyecto de reutilización de aguas y cómo hacerlo. Los análisis monetarios se dividen en dos categorías: el análisis económico y el análisis financiero. El análisis económico se centra en el valor de los recursos que, para su instalación y explotación, se invierten en un proyecto, medido en términos monetarios y computado al valor actual. El resultado básico del análisis económico sirve para contestar a la pregunta: ¿Debería de construirse un proyecto de reutilización de aguas?

El análisis financiero considera si un proyecto de reutilización hídrica es factible en términos financieros. El promotor del proyecto necesitará una fuente de capital y fuentes de ingresos para pagar las deudas que genera el servicio y los costes de explotación para el proyecto de reutilización de aguas propuesto y alguna instalación que ya exista, al mis-

mo tiempo. Así que la pregunta igualmente importante a la que hay que responder en el análisis financiero es: ¿Puede construirse un proyecto de reutilización de aguas?

Un malentendido que se da con frecuencia en la planificación para la reutilización de las aguas es que las aguas residuales recuperadas representan un nuevo suministro de agua de bajo coste. Este supuesto es admisible sólo cuando las instalaciones de recuperación de aguas residuales se localizan lo suficientemente cerca de los grandes usuarios agrícolas o industriales y cuando no se requiere ningún tratamiento adicional fuera de las instalaciones de control de contaminación hídrica en las que se suministra el agua recuperada. Los sistemas de transporte y distribución del agua recuperada representan el coste principal de la mayoría de los proyectos de reutilización del agua. Las últimas experiencias en California indican que se necesitan aproximadamente cuatro millones de dólares en costes de capital por cada millón de m³ por año de agua recuperada que se pone a la disposición del usuario. Suponiendo una vida de 20 años para las instalaciones y una tasa de intereses del 9%, el coste amortizado de esta agua recuperada es de \$0.44/m³, excluyendo los costes de organización y métodos (O & M).

INFORME SOBRE LA PLANIFICACIÓN DE LAS INSTALACIONES

Los resultados de todo ese esfuerzo de planificación deben de plasmarse en un informe sobre las instalaciones para la recuperación y reutilización de las aguas residuales. Una sugerencia que sirve de esbozo para dicho informe se ilustra en la *tabla 2* que también sirve como lista de comprobación para los procedimientos de planificación. El siguiente paso lógico sería el diseño de las instalaciones. Sin embargo, resulta de igual importancia conseguir usuarios para captar el agua recuperada una vez esté disponible. Unas detalladas observaciones sobre los contratos de usuario pueden hallarse en Asano and Mills, 1990. Otros factores de planificación de particular importancia son la ingeniería y la salud pública. La ingeniería no sólo consiste en el diseño del sistema para la distribución del agua. Un proyecto para la reutilización del agua supone tener en cuenta un suministro de agua a escala relativamente pequeña que incluya el equilibrar las necesidades y disponibilidad del agua, un nivel adecuado de tratamiento de las aguas residuales, el almacenamiento del agua recuperada, y un suministro complementario o de reserva. Debido a la importancia que para la recuperación y reutilización de las aguas residuales tiene la protección de la salud pública, la sección siguiente se dedica por entero a la discusión de este punto.

TABLA 2
ESBOZO DE UN PLAN DE INSTALACIONES PARA LA RECUPERACIÓN
Y REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

1. **Características de la zona de estudio:** geografía, geología, clima, acuíferos, usos del suelo, crecimiento de la población.
2. **Características e instalaciones del suministro de agua:** competencias de la agencia gestora de las aguas, procedencia y calidad del suministro, descripción de las principales instalaciones, tendencias en el uso del agua, futuras necesidades en instalaciones, gestión y problemática del agua subterránea, costes actuales y futuros del agua potable, subvenciones y precios al cliente.
3. **Características de las aguas residuales e instalaciones:** competencias de la agencia, descripción de las principales instalaciones, cantidad y calidad de las aguas residuales tratadas, caudal por temporada y día y variaciones en su calidad, futuras necesidades en instalaciones, necesidad de un control de la procedencia de los constituyentes que afectan a la reutilización, descripción de la reutilización actual (usuarios, cantidades, acuerdos contractuales y precios).
4. **Requisitos para el tratamiento de vertidos, la reutilización y otras restricciones:** requisitos relacionados con la salud y la calidad del agua, requisitos sobre la calidad específicos para el usuario, controles sobre la zona de utilización.
5. **Potenciales clientes que aprovecharán las aguas reutilizadas:** descripción de los procedimientos de análisis de mercado, inventario de los potenciales usuarios y resultados de su estudio.
6. **Análisis de los proyectos alternativos:** costes de capital, de explotación y de mantenimiento, viabilidad de las soluciones técnicas de ingeniería, análisis económico, análisis financiero, análisis de energía, impactos en la calidad del agua, aceptación pública y de mercado, impactos de los derechos hídricos, impactos medioambientales y sociales, comparación y selección de alternativas
 - a) Alternativas en el tratamiento.
 - b) Mercados alternativos: sobre la base de diferentes niveles de tratamiento y áreas de servicio.
 - c) Vías alternativas para las conducciones.
 - d) Emplazamientos alternativos para el almacenamiento de las aguas recuperadas residuales.
 - e) Alternativas de agua potable.
 - f) Alternativas de control de la contaminación del agua.
 - g) Ausencia de proyecto alternativo.
7. **Proyecto recomendado:** descripción de las instalaciones propuestas, criterios preliminares de diseño, coste presupuestado, relación de potenciales usuarios y destinatarios, cantidad y variación de la cantidad de agua recuperada en relación al suministro, fiabilidad del suministro y necesidad de aportación de agua adicional o de reserva, plan de ejecución, plan de funcionamiento.
8. **Plan de financiación de la construcción y programa de ingresos:** recursos y temporización de fondos para el diseño y la construcción, política de precios para el agua recuperada, asignación de costes entre los beneficiarios del suministro de agua y medios para el control de la contaminación, planes para la futura utilización del agua recuperada, precio del agua potable, costes del proyecto de recuperación, costes por unidad, ingresos brutos, subvenciones, depreciación de costes y endeudamiento, análisis de sensibilidad a la modificación de condiciones.

Según Asano y Mills, 1990.

CONSIDERACIONES SOBRE LA SALUD Y LA LEGISLACIÓN

En todo proceso de recuperación y reutilización de aguas residuales, existe algún riesgo de exposición humana a los agentes infecciosos. Los contaminantes presentes en las aguas residuales recuperadas de mayor repercusión para la salud pueden clasificarse como agentes biológicos y químicos. Para la mayoría de los usos de las aguas residuales recuperadas, los organismos patógenos son los que causan los principales riesgos, que incluyen los patógenos bacterianos, los helmintos, los protozoos y los virus.

Para proteger la salud pública, se han realizado considerables esfuerzos en orden a establecer unas condiciones y normas que permitan el uso seguro de las aguas residuales recuperadas. Aunque no exista ninguna serie estándar uniforme, se ha podido disponer de normas internacionales, nacionales y estatales sobre las aguas residuales (State of California, 1978; World Health Organization, 1989; U.S. EPA, 1992). Pese a que estas directrices y normas sobre las aguas residuales recuperadas carecen de evidencia epidemiológica explícita donde basar una evaluación de los riesgos sanitarios, se han adoptado, sin embargo, como normas pertinentes y aplicables a la planificación y ejecución de proyectos para la recuperación y reutilización de las aguas residuales (Asano et al., 1992).

Por ejemplo, el Estado de California exige que el agua recuperada que se utiliza para el riego de jardines de las zonas con libre acceso público sea «oxidada, filtrada y desinfectada adecuadamente antes de su uso», con una cantidad media total de coliformes no mayor de 2.2/100 mL. Para cumplir estas exigencias, se requieren procedimientos de tratamiento de aguas residuales del tipo de tratamiento secundario biológico y tratamiento terciario con filtración, seguido de desinfección.

La *tabla 3* contiene un resumen de las normas que se aplican en California sobre las aguas residuales recuperadas destinadas al riego y a las zonas recreativas. Nótese que hay muchas aplicaciones de reutilización que no requieren un alto grado de tratamiento de las aguas residuales. Los Criterios de California para la Recuperación de Aguas Residuales (habitualmente llamado la norma Título 22) son básicamente normas sanitarias. Así que los criterios no se dirigen específicamente a la tecnología del tratamiento ni al efecto potencial del agua recuperada sobre las cosechas y el suelo. El promedio de la cantidad total de coliformes y el de turbiedad se emplean para evaluación de la fiabilidad del tratamiento de la planta de recuperación de las aguas residuales. Los Criterios están siendo revisados y aumentados para dar cabida a normas pormenoriza-

das sobre la recarga del agua del subsuelo, sobre las torres de refrigeración y las aplicaciones para el interior de los edificios, incluyendo los retretes.

Las medidas adicionales de seguridad para las aplicaciones no potables de la reutilización del agua incluyen: (1) la instalación de sistemas separados de almacenamiento y distribución del agua potable; (2) uso de etiquetas codificadas por colores para distinguir las instalaciones de tuberías de agua potable y no potable; (3) dispositivos para la prevención del reflujo y de la interconexión, (4) el uso periódico de tintes trazadores para detectar la posible contaminación cruzada en las vías de suministro potables, y (5) el riego en horas de bajo consumo para minimizar todavía más el riesgo potencial por el contacto humano.

EL COSTE DE LA RECUPERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

Los informes proporcionan unos costes para la recuperación de las aguas residuales que varían ampliamente entre \$0.03 a 0.65/m³ de coste total. Por lo tanto, al comparar los costes, resulta importante que se comprendan bien las diferencias entre los supuestos y los factores asociados con la asignación de costes a la recuperación y reutilización de las aguas residuales. Aunque los costes asociados con el tratamiento secundario de las aguas residuales se consideran a menudo como costes de control de contaminación en EE.UU., sirven como coste de base para la comparación con las instalaciones destinadas al tratamiento terciario y/o avanzado. El desglose de los costes de construcción para distintos procesos de tratamiento dentro de un sistema de tratamiento secundario se calcula sobre una base de 3,785 m³/d cuyo coste de capital total alcanza \$0.47/m³; el tratamiento primario, el 24%; el tratamiento secundario, 40%; el tratamiento de fangos, el 22%; y las instalaciones destinadas a control, laboratorios y mantenimiento, el 14%; como porcentaje del coste de capital total de un sistema de tratamiento secundario.

A mediados de los años 70, la preocupación sobre la eliminación de los patógenos, sobre todo de los virus entéricos, en las aguas residuales vertidas en los cauces de aguas discontinuas en el sur de California provocó la adopción de los procesos convencionales de tratamiento del agua tales como el sistema terciario de tratamiento de aguas residuales en el vertido, no sólo en los cauces urbanos, sino para las aplicaciones de la reutilización del agua de alta exposición. Para lograr unos efluentes libres de virus, el «tratamiento completo», estipulado por el Departamento de Servicios Sanitarios de California para la recuperación, consistía en la coagulación, la floculación, la sedimentación, la filtración, y la desinfección (con

TABLA 3
RESUMEN DE LOS CRITERIOS SOBRE RECUPERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN EL ESTADO DE CALIFORNIA, 1978

Aplicaciones de las aguas residuales recuperadas	Descripción de las características mínimas de las aguas residuales			
	Efluentes a) primarios	Secundarios y desinfectados	Secundarias coaguladas, filtradas b) y desinfectadas	Total media de coliformes /100 mL
Riego de cultivos:				
Pienso	X			NR c)
Fibra	X			NR
Granos	X			NR
Alimentos para comer sin cocción con riego superficial		X		2.2
Alimentos para comer sin cocción con riego por pulverización			X	2.2 d)
Alimentos para ser cocidos con riego por pulverización		X		23 e)
Riego de jardines: campos de golf, autovías			X	23
Riego de jardines: parques, campos de recreo			X	2.2
Zonas acotadas para el ocio:				
Sin contacto con el público			X	23
Sólo deporte náutico y pesca			X	2.2
Contacto corporal (baño)			X	2.2

- a) Efluentes con una cantidad de sólidos sedimentables inferior a 0.5 mL/L/h. No se emplean actualmente en California aguas residuales primarias y se prevé que esta categoría sea suprimida en las normas futuras.
- b) Los efluentes no sobrepasan un promedio de 2 unidades de turbiedad (NTU) y no exceden de 5 NTU durante más del 5% de ningún período de 24 horas.
- c) No hay requisitos (ver nota a)).
- d) La media de organismos coliformes que contienen las aguas no excede de 2.2/100 mL y el total de estos organismos no sobrepasa 23/100 mL en más de una muestra tomada dentro de un período de 30 días. A este requisito se le suele llamar erróneamente como el del Título 22 (véase la explicación en el texto).
- e) La media de organismos coliformes en los efluentes no sobrepasa los 23/100 mL en un período de 7 días consecutivos ni excede los 240/100 mL en dos muestras consecutivas.

dosis químicas de aproximadamente 150 mg/L alumbre, 0.2 mg/L polímero, y 10 mg/L cloro). Este proceso sucesivo se denomina frecuentemente «el proceso del Título 22» debido a su inclusión con la referencia proceso secuencial en el Título 22 del Código de Normas de California, «Wastewater Reclamation Criteria» (State of California, 1978).

Puesto que el «proceso del Título 22» resulta caro, como se demuestra en la *tabla 4*, se usa habitualmente en California el sistema de tratamiento terciario «filtrado directo», que consiste en la filtración granular (con o sin una pequeña cantidad de alumbre añadida dentro de la gama 2-5 mg/L) y la desinfección por cloro (con una dosis de aproximadamente 10 Mg/L de cloro y un tiempo de contacto de 1.5 horas). Se han dirigido considerables esfuerzos para impulsar el desarrollo de sistemas de tratamiento terciario alternativos al «Proceso del Título 22», especialmente en el Estudio vírico de Pomona (Dryden et al., 1979) y el Estudio Monterrey sobre la Recuperación de las Aguas Residuales para la Agricultura (Sheikh et al., 1990). El proceso de «filtrado directo» ha demostrado ser particularmente adecuado como sistema de tratamiento terciario cuando se dispone de unas aguas residuales de buena calidad. Para su destino al entorno urbano (parques, escuelas y campos de golf), se han construido un número creciente de instalaciones de reutilización que emplean un sistema terciario de filtrado directo. Más de 40 filtros de parecidas características se emplean en California, dedicados específicamente para la recuperación del agua (State of California, 1990).

Al objeto de calcular el coste del sistema de tratamiento terciario, se han empleado varias fuentes procedentes de las distintas publicaciones existentes (Sanitation Districts of Los Angeles County, 1977; Dames & Moore, 1978; Engineering-Science, 1987; Young et al., 1988). Los costes para el «proceso del Título 22» y para el «proceso de filtrado directo» se han calculado y se exponen en la *tabla 4*. El desglose de los costes en un caso indicaba que los costes del tratamiento terciario incrementales (aditivos químicos, filtrado, tratamiento de sólidos) se estimaban en tan sólo \$0.06/m³ (\$79/af) mientras los costes de distribución, gastos administrativos, (contabilidad, seguimiento, gastos generales), y cuotas de reserva de sustitución se estimaban en \$0.12/m³ (\$142/af), \$0.04/m³ (\$54/af), y \$0.04/m³ (\$50/af), respectivamente. Es de destacar la importancia que representan los costes de mano de obra y energía en el sistema de reutilización del agua (Young et al., 1988). Las proporciones de costes del tratamiento terciario para el proceso de tratamiento del «Título 22» al proceso de «filtrado directo» varía entre 2.0 a 2.4 para los costes de capital, 3.9 a 5.6 para costes de organización y métodos (O. y M.), y 2.4 a 2.9 para los costes del ciclo vital para las capacidades de tra-

tamiento que variaban desde 3,785 m³/d a 37,854 m³/d (Richard et al., 1990).

Sin embargo, existe un peligro al comparar los datos sobre los costes cuando provienen de diferentes estudios y localidades por culpa de los diferentes supuestos subyacentes, que muchas veces no se indican explícitamente. Como se puede apreciar en los datos que se muestran en la *tabla 4*, los costes se ven bastante afectados por la fracción de tiempo que se utilice una instalación a lo largo de un año. Las expectativas económicas sobre la vida útil y las tasas de interés afectan a la amortización de los costes de capital incluidos en los costes unitarios. Los costes presentados pueden representar los gastos actuales para unas instalaciones antiguas y no reflejar los costes para la construcción de esas mismas instalaciones a los precios de hoy día, como se aprecia en el Irvine Ranch Water District de California.

Un factor que parece afectar a los costes de una manera importante es el grado en que se utiliza la capacidad disponible en la planta de tratamiento. Una utilización óptima puede lograrse por (1) el almacenamiento temporal de aguas residuales para compensar bajas temporales en la demanda de reutilización del agua, (2) obtención de una variación de usos del agua para reducir la demanda temporal, o (3) utilizar suministros alternativos de agua para cubrir la demanda punta.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

El crecimiento continuo de la población, la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, una distribución desequilibrada de los recursos hídricos y las sequías periódicas han obligado a las agencias que gestionan el agua a buscar fuentes innovadoras y alternativas para el suministro hídrico. La recuperación y reutilización de las aguas residuales combinan muchos de los principios fundamentales del suministro de agua y del tratamiento de las aguas residuales de una manera altamente especializada. La reutilización del agua se contempla cada vez más como un medio para aumentar los recursos hídricos existentes y futuros, contra el espectro de la demanda creciente de agua. El agua recuperada es, al fin y al cabo, un recurso que se encuentra en el mismo umbral del entorno urbano y una fuente fiable incluso en años de sequía, capaz de sustituir el agua potable para usos no potables o sub-potables.

A través de una planificación integrada para la reutilización del agua, como se explica en esta ponencia, el uso del agua recuperada puede proporcionar una flexibilidad suficiente que permita satisfacer a estas agencias del agua las necesidades a corto plazo, además de aumentar la fiabilidad del suministro hídrico. Con un mayor énfasis en la pla-

TABLA 4
COMPARACIÓN DE LOS COSTES DEL TRATAMIENTO TERCIARIO
PARA LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA a)

Procedencia de los datos (Caudal en planta)	Costes del ciclo vital			
	Título 22		Filtración directa	
	\$/m ³	\$/af b)	\$/m ³	\$/af b)
Estudios sobre el virus Pomona c) (3.785 m ³ /día)	0,16	197	0,09	104
Método de cálculo coste EPA d) (3.785 m ³ /día)	0,23	284	0,15	182
Ciudad de Santa Bárbara, CA e) (5.262 m ³ /día) f) (17.034 m ³ /día) g)			0,21 0,10	259 120
Distrito de aguas de la Costa Sur CA. e) (2.915 m ³ /día) h) (9.880 m ³ /día) i)			0,42 0,14	512 168
Distrito de aguas Irving Ranch (56.781 m ³ /día)			0,09	104
Distritos de saneamiento del condado de Los Ángeles (promedio de 4 plantas de tratamiento) (96.528 m ³ /día)			0,03	41
Agencia regional de control de la contaminación del agua, Monterrey j) (113.562 m ³ /día)	0,16	192	0,06	79

- a) Costes ajustados a marzo de 1993, empleando un índice 5,106 del Engineering News-Record Construction Cost (ENR CCI) para una media de 20 ciudades de Estados Unidos. Los costes descritos incluyen los de capital, organización y métodos tan sólo para los procesos terciarios.
- b) el acre -foot (af) equivale a 1.243 m³.
- c) Los costes incluyen el diseño y las eventualidades.
- d) Los costes incluyen la planificación de las instalaciones, el diseño y los costes administrativos y legales.
- e) Los costes incluyen el diseño y los costes administrativos, legales y de las eventualidades.
- f) Coste del funcionamiento temporal para riego de parques y jardines con un caudal medio de 5.262 m³/día.
- g) Coste de funcionamiento continuo para la capacidad de diseño de 17.034 m³/día.
- h) Coste del funcionamiento temporal para riego de parques y jardines a 2.915 m³/día.
- i) Coste de funcionamiento continuo para la capacidad de diseño de 9.880 m³/día.
- j) Cálculos de coste basados en el informe de Engineering-Science (1987), ajustado al valor en dólares de 1990.

nificación e ejecución de las instalaciones para la recuperación y reutilización de las aguas residuales, es imprescindible contar con datos precisos sobre los costes. Por eso, se ha presentado la información sobre los costes, aunque existen variaciones significativas en los costes de recuperación y reutilización de las aguas residuales. Se han indicado, sin embargo, ciertas observaciones de carácter precautorio para la comparación de costes. Mientras las sequías suelen subrayar la necesidad de recuperar y reutilizar las aguas residuales, esto no supone de ninguna manera una alternativa de gestión hídrica exclusiva para años de sequía, sino que debería con-

siderarse como una parte íntegra y permanente de la planificación de los recursos hídricos.

AGRADECIMIENTOS

Cierta información contenida en esta ponencia ha sido actualizada y revisada. No obstante, algunos fragmentos del material presente en esta ponencia se han presentado en varios lugares, como el Simposio Hídrico de Estocolmo, Suecia en 1992, y el Simposio sobre la Economía Hídrica organizado por Las Aigües de Barcelona, Barcelona, España en 1993.

