

Resumen

La reutilización de aguas residuales es creciente en todos los países que padecen limitaciones en su cantidad y/o calidad. Uno de los usos más novedosos del agua regenerada es la reutilización potable indirecta, ya que aumenta su disponibilidad al introducir agua residual regenerada, intensamente tratada, en los acuíferos o aguas superficiales asociadas a procesos de potabilización. Existen muchas experiencias prácticas en el mundo y estudios que avalan la seguridad de estos procesos. De entre las diversas tecnologías disponibles se destaca la ósmosis inversa, con más de 30 años en la reutilización potable indirecta en los USA. No obstante, la expansión de estos sistemas sigue aún frenada, no por motivos económicos o tecnológicos, sino por la desconfianza de la opinión pública. Este texto plantea, desde un punto de vista técnico y científico, los principales retos a resolver para dar seguridad a la reutilización potable indirecta, proceso que está avalado como fuente adicional de recursos de agua no convencionales, con todas las implicaciones y beneficios que ello conlleva.

Palabras clave:

Agua regenerada, reutilización, regeneración avanzada, ósmosis inversa, normativa, microcontaminantes, ensuciamiento, bioensuciamiento.

Abstract**Basic aspects of the use of reverse osmosis in indirect potable reuse**

Wastewater reclamation and reuse is an increasing activity in those countries who are facing water restrictions both in quality and quantity, and it has become an integral part of water resources management. Among several applications of reclaimed wastewater, one of the most interesting and innovative is indirect potable reuse. This consists in the purposeful augmentation of surface or groundwater resources with highly treated reclaimed water which will ultimately serve as a source of drinking water. There are world-wide experiences confirming that this kind of application is safe. The use of reverse osmosis for wastewater reclamation is very interesting and the use of this in indirect potable reuse started more than thirty years ago, mainly in USA. However the extension of this kind of applications is in some way low, not for economic issues or technology faults, but the ignorance, distrust or public opinion rejection. In this paper, the most important challenges, from a technical and scientific point of view, of indirect potable reuse are discussed to allow it to be used as a safe, reliable and additional water source: with all its implications and, of course, with all its benefits.

Key words:

reuse, advanced reclamation, reverse osmosis, regulations, micro-pollutants, fouling, biofouling.

Aspectos básicos de la aplicación de la ósmosis inversa a la reutilización potable indirecta

Por: López Ramírez, Juan Antonio (*); Sales Márquez, Diego (*); Quiroga Alonso, José María (*); y Asano, Takashi (**)

(*). Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente
Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales
Universidad de Cádiz
Polígono Río San Pedro, s/n
11510 Puerto Real (Cádiz)
Tel.: 956 016 157 – Fax: 956 016 040
E-mail: juanantonio.lopez@uca.es

(**) Department of Civil and Environmental Engineering
University of California at Davis
Davis, CA 95616 (Estados Unidos)
Premio Estocolmo del Agua 2001

1. Introducción

La reutilización de las aguas residuales es una actividad creciente en todo el mundo, habiéndose convertido en parte intrínseca de la gestión integral de los recursos del agua. Son varios los factores que han conducido a ello. Entre estos factores podemos destacar los siguientes: la falta de agua disponible en muchos lugares del planeta, la creciente demanda de agua de las sociedades modernas, la contaminación de las fuentes de abastecimiento, la imposibilidad física de ubicar nuevos embalses, la necesidad de resolver los vertidos de aguas residuales, etc. Todo ello ha conducido a que la reutilización de las aguas residuales sea, a veces, la única fuente alternativa de agua en muchas zonas del mundo para corregir los déficits hídricos.

En este artículo se discuten algunos de los principales aspectos relacionados con los desafíos tecnológicos, de protección de la salud pública y de requerimientos legales que deben ser afrontados para que la

reutilización potable indirecta se convierta en una parte más de la gestión de los recursos de agua en aquellas zonas que afrontan déficits crónicos de agua.

2. ¿Qué es la reutilización potable indirecta?

Por reutilización potable indirecta se entiende el aumento deliberado de las reservas hidráulicas, superficiales o subterráneas, mediante la mezcla adecuada de las aguas naturales del sistema receptor con agua regenerada obtenida a partir de agua residual, con el fin de utilizarla como fuente para abastecimiento público.

Evidentemente existen factores que deben estar perfectamente definidos en el proyecto de reutilización planificada indirecta potable. Entre algunos de estos aspectos están: el sistema de regeneración de las aguas residuales que debe ofrecer total garantía de funcionamiento, eficacia y fiabilidad, y la mezcla adecuada de las aguas regeneradas y naturales. Ambos aspectos son pie-

zas fundamentales en este tipo de proyecto y deben garantizar, además del adecuado funcionamiento del mismo, la garantía de la salud pública y un aspecto que en ocasiones no se ha valorado de forma importante y con el que se ha demostrado es preciso contar: la aceptación pública.

2.1. Ventajas de la reutilización potable indirecta

Las zonas que tradicionalmente sufren problemas con la existencia de niveles de recursos hidráulicos insuficientes, suelen enfrentarse a un problema añadido: la contaminación de dichos recursos. Existen muchos cursos de agua donde el vertido de los efluentes, incluso depurados, suponen limitaciones a los posteriores usos legítimos de dichas aguas receptoras. Es previsible pensar por tanto que, en el futuro, muchas normas reguladoras de límites de vertido impondrán niveles aún más restrictivos. Es por ello que en aquellas zonas donde la sequía es un hecho cotidiano y que condiciona, fuertemente, el entorno socioeconómico y medioambiental, será necesario desarrollar nuevas pautas de gestión de los recursos hídricos disponibles y que, entre otras, incluyan a la reutilización potable indirecta. Ésta resuelve, además, el problema del vertido de los efluentes, dado el nivel de tratamiento que alcanzan las aguas regeneradas. Por último, supone una fórmula más interesante y viable de llevar a cabo políticas de conservación de agua y de uso racional de ésta, más incluso que la construcción de grandes infraestructuras, que aún siendo útiles no terminan de resolver el problema de la demanda desbordada del agua en determinadas zonas.

De lo expuesto anteriormente se deduce que todas aquellas medidas correctoras conducentes a un aumento en las reservas de agua, y que no conlleven ninguna disminución en la calidad de ésta, serán acciones muy beneficiosas para el balance hi-

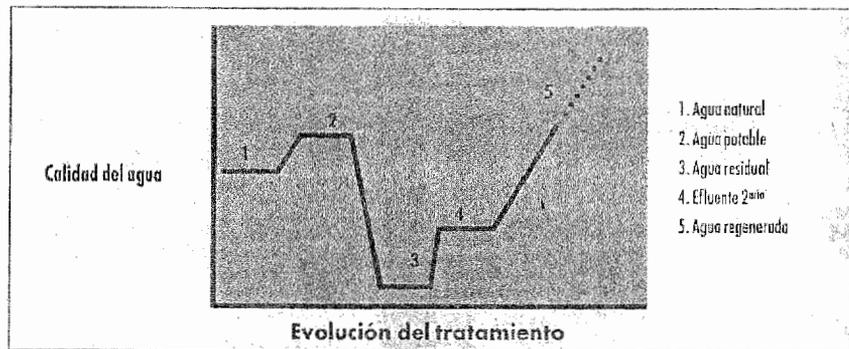


Figura 1. Escala comparativa en la que aparece representada la calidad relativa del agua en función de su naturaleza y el nivel de tratamiento aplicado.

dráulico de la zona en cuestión. En este sentido la reutilización potable indirecta se muestra especialmente indicada para ello. En la bibliografía se recogen numerosos proyectos de reutilización potable indirecta, realizados principalmente en Estados Unidos, (Mc Eween *et al.*, 1997, Adin A. y Asano, T.).

3. La ósmosis inversa y la reutilización potable indirecta

Teniendo en cuenta que es habitual que el agua de mejor calidad sea destinada para consumo humano, y que en la reutilización potable indirecta puede tener lugar, la calidad que debe alcanzar el agua regenerada ha de ser máxima. Así, son varias las tecnologías que se pueden emplear para conseguir dicho grado de calidad; entre ellas, destacan especialmente, las tecnologías de membranas, y en particular la ósmosis inversa. Son múltiples los proyectos de demostración y programas de reutilización a escala industrial en los que se ha aplicado esta tecnología por las indudables ventajas que ofrece. Entre éstas destacan:

- Alta eficacia de las membranas para el rechazo selectivo de componentes.
- Aumento progresivo de la permeabilidad de las membranas.
- Abaratamiento de los costes de fabricación y aumento del número de fabricantes.
- Cumplimiento de las normativas más exigentes para la protección

de la salud pública y medioambiente.

- La separación tiene lugar a temperatura ambiente sin cambio de fase.
- No hay acumulación de productos dentro de las membranas, al contrario de procesos como el intercambio iónico.
- La separación no necesita de la adición de productos químicos como puede ser el caso de la clarificación del agua mediante procesos de coagulación/floculación.
- Desarrollo de polímeros altamente eficaces, más resistentes, etc.

Debido a ello la utilización de las tecnologías de membranas crece en todo el mundo a un fuerte ritmo. Se estima que en 1987 el mercado mundial de membranas había movido 363 millones de dólares, mientras que en 1997 se habían alcanzado la cifra de los 1.100 millones de dólares (Wiessner and Chellam, 1999). De ellos, el 40 % se había destinado a aplicaciones relacionadas directamente con el tratamiento del agua y agua residual. Estas grandes sumas de dinero reflejan la fuerte implantación y la gran confianza que esta tecnología está teniendo para la industria.

No obstante, existen algunos retos que debe afrontar la ósmosis inversa para superar el desafío que supone la reutilización potable indirecta de los efluentes. El principal reto le es inherente a su funcionamiento: el ensuciamiento (*fouling*)

de las membranas. Este problema repercute de forma importante sobre el adecuado rendimiento de las unidades, lo cual a su vez se traduce en un aumento de los costes de operación y, por supuesto, en la rentabilidad del proceso. El ensuciamiento coloidal y biológico pueden llegar a suponer un importante problema para la productividad de los sistemas de membranas. Los procesos fisicoquímicos que rigen estos procesos no son del todo conocidos, a pesar de los grandes esfuerzos que se realizan para su entendimiento. Por ello, un buen conocimiento de éstos conduciría a la selección de las mejores condiciones de funcionamiento de las membranas, lo que además de prolongar su vida, conseguiría una mejora en la rentabilidad del proceso. Resulta pues de gran importancia conocer dichos mecanismos y la obtención de algún tipo de modelización fiable que ayude a eliminar o, al menos, reducir los ensayos de planta piloto, tan necesarios hoy en día para los grandes proyectos.

3.1. Ensuciamiento y bioensuciamiento (*fouling and biofouling*)

Se puede definir el ensuciamiento (*fouling*) como la adhesión indeseada de depósitos sobre la superficie de las membranas. Ésto ocurre cuando los sólidos rechazados no son transportados desde la superficie de las membranas al seno de la disolución. Como consecuencia de ello se produce la precipitación de sales, la adsorción de moléculas orgánicas, la deposición de material coloidal y la adhesión y crecimiento microbiano. Todos estos efectos disminuyen notablemente las características de funcionamiento de las membranas. Por su parte, el bioensuciamiento (*biofouling*) consiste en la deposición y fijación de microorganismos y sus polímeros extracelulares sobre la superficie de las membranas, lo que agrava el proceso de ensuciamiento. Habitualmente, y si no existe el adecuado con-

trol, ambos problemas aparecen conjuntamente.

3.1.1. Efecto de las condiciones de operación

Las condiciones de operación influyen notablemente en el funcionamiento de las unidades de ósmosis inversa, así como la carga eléctrica de los coloides, las características de hidrofobicidad/hidrofilicidad de la materia orgánica y de las membranas, las estructuras superficiales de éstas, la conversión de las unidades, etc.

Aunque han sido numerosos los estudios destinados a profundizar en el fenómeno de ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa, todavía quedan aspectos que deben ser aclarados. Uno de los primeros estudios que se realizó al respecto fue realizado por Winfield (1979 a y b) que estudió el ensuciamiento que sufrían las membranas de acetato de celulosa al tratar un efluente secundario. La conclusión que extrajo indicaba que la materia orgánica disuelta tiene un papel más importante en el ensuciamiento de las membranas que el material en suspensión, pero en su estudio no distinguía entre el material coloidal de muy pequeño tamaño y el material orgánico disuelto.

Los coloides que se encuentran en las aguas residuales poseen cargas negativas, aunque tienden a reducirse cuando aumenta la fuerza iónica de la solución, como consecuencia de la compresión de la doble capa. Las membranas de poliamida y acetato de celulosa también presentan una carga negativa a los valores de pH de trabajo normales (pH = 6,5 y 5,5 respectivamente). En un principio se espera que se desarrollen repulsiones eléctricas entre las dobles capas de las partículas coloidales y la superficie de las membranas que eviten el ensuciamiento, pero esto no siempre ocurre así, ya que la tasa de conversión aplicada a las membranas condiciona notablemente la magnitud que alcanza la fuerza de repulsión entre

ambas cargas negativas, llegando incluso a minimizarla.

La tasa de permeado tiene una gran importancia en el ensuciamiento de las membranas pues como han demostrado Song y Elimelech, (1995), la tasa de deposición coloidal sobre una superficie permeable está controlada por una interacción entre la fuerza de repulsión entre las dobles capas eléctricas (membrana-coloides) y una fuerza hidrodinámica (*permeation drag*) resultante del transporte convectivo (el producto de la conversión y la concentración coloidal) hacia la membrana. La fuerza de obstáculo a la permeación (*permeation drag*) es proporcional al flujo de permeado, actuando perpendicularmente a la superficie de la membrana y en dirección opuesta a la fuerza de repulsión de las dobles capas eléctricas. Bajo condiciones típicas de operación su valor puede ser importante, superando a la repulsión de las dobles capas, resultando de todo ello una deposición de partículas y, por consiguiente, el ensuciamiento de la membrana. También Zhu y Elimelech (1997) demostraron que el *fouling* en una membrana aumenta al hacerlo la conversión, pues aumenta el transporte convectivo hacia ésta. Como ejemplo de esto, en la Figura 4 aparece una micrografía electrónica de barrido (x6000) de una membrana de poliamida aromática probada en la planta piloto para la reutilización de aguas residuales urbanas de Chiclana de la Frontera, Cádiz. Tras ser sometida a condiciones de operación en las que se le exigía una elevada conversión que acelerasen su ensuciamiento se procedió a realizarle la autopsia. Ésta reveló la existencia de una importante biopelícula y la deposición de gran cantidad de material coloidal tras las condiciones empleadas.

Las estructuras superficiales que poseen las membranas de acetato de celulosa y membranas compuestas de poliamida, también, repercuten de forma importante sobre su tendencia a ensuciarse. En el primer ca-

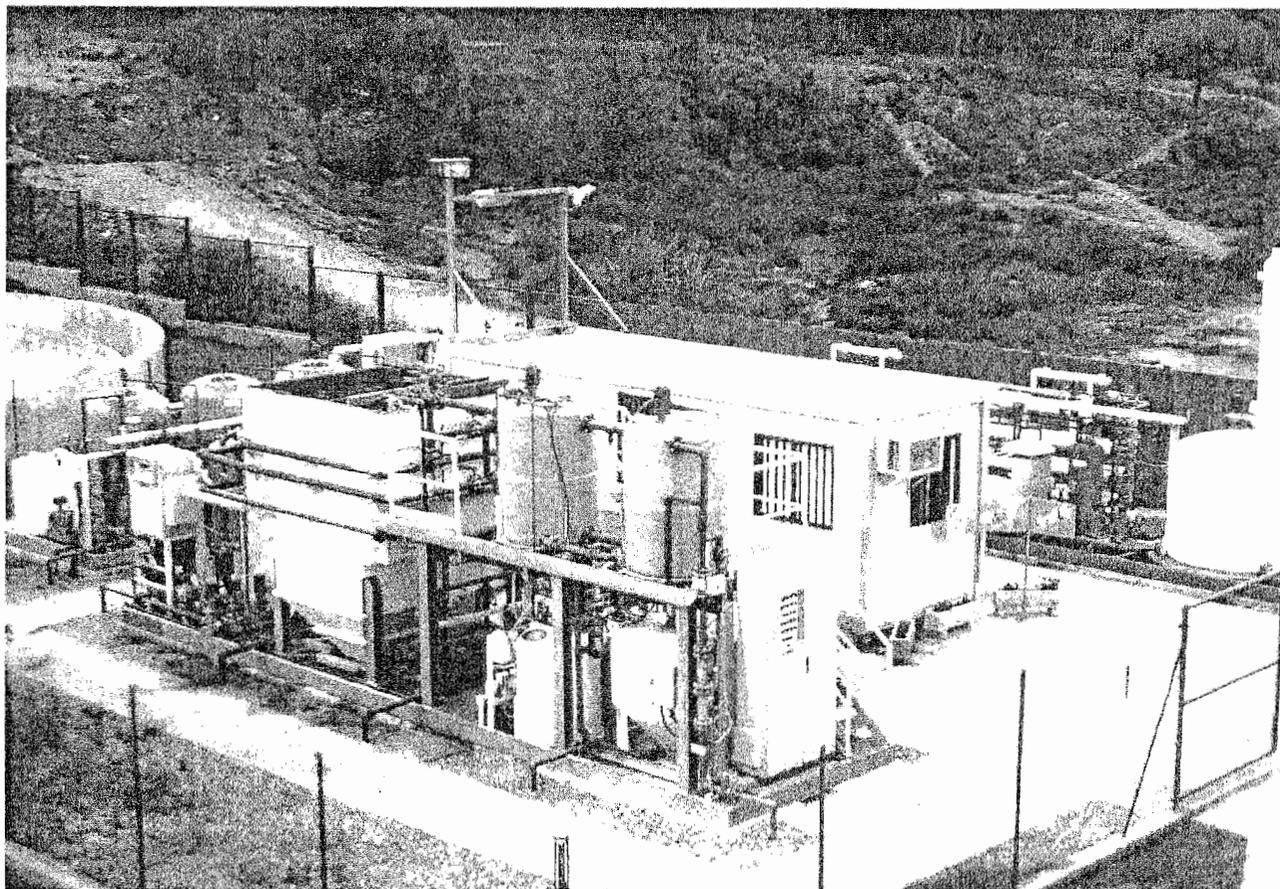


Figura 2. Planta piloto experimental para la reutilización de aguas residuales urbanas de Chiclana de la Frontera, primera construida en España. En ella se han realizado distintos tipos de estudio de regeneración avanzada de aguas residuales con diferentes tipos de membranas de ósmosis inversa.

so su estructura superficial es prácticamente lisa, mientras que las de poliamida tienen una estructura marcadamente rugosa con "picos y valles" pronunciados, lo cual es característico del tipo de fabricación de estas membranas, haciendo que ésta tenga mayor tendencia al ensuciamiento. Ello, junto con la mejor permeabilidad de las membranas de poliamida, conduce a que éstas tengan una mayor tendencia al ensuciamiento (Elimelech *et al.*, 1997)

Una forma de reducir el ensuciamiento de las membranas es aumentar la fuerza de repulsión entre las dobles capas eléctricas, añadiendo por ejemplo, un tensioactivo aniónico (Liton y Olson, 1994). La adsorción de las moléculas de tensioactivo aniónico sobre las superficies químicamente heterogéneas, dan lugar a una distribución uniforme de la capa superficial y, como conse-

cuencia de ello, un aumento de las fuerzas de repulsión. No obstante, el ensuciamiento de las membranas no desaparece. Campbell *et al.* (1999) observaron este fenómeno cuando estudiaban la reducción de adhesión de *Mycobacterium Sp.* a membranas de acetato de celulosa y poliamida aromática mediante el empleo de diferentes tipos de tensioactivos.

3.2. Presencia de contaminantes traza en el permeado

Otro de los aspectos que suscita cierto interés en la aplicación de la ósmosis inversa a la reutilización de efluentes es la presencia, aunque a muy bajas concentraciones (ppb), de contaminantes orgánicos traza en las aguas regeneradas. Son pocos los estudios que se han realizado debido a la dificultad inherente en la identificación de estos compuestos,

a las bajas concentraciones en las que aparecen y también a la heterogeneidad de los mismos.

El primer estudio que investigó la presencia de materia orgánica disuelta en los efluentes regenerados fue el de Whittier Narrows en los años 70; posteriormente le han seguido otros como el estudio de evaluación de riesgos de San Diego, el realizado en Lake Arrowhead y el que se realiza actualmente en West Basin, California. En este último estudio se han realizado determinaciones y la identificación de parte de la fracción orgánica de los compuestos neutros presentes en las aguas regeneradas. Aunque la ósmosis inversa es una técnica que se caracteriza por el elevado rechazo de los compuestos disueltos en el agua, se ha podido comprobar que hay una parte de la materia orgánica neutra que es capaz de atravesar las

membranas; se trata especialmente de compuestos de bajo peso molecular y muy volátiles (Levine *et al.*, 2000). Esto no quiere decir que la ósmosis inversa no sea una técnica efectiva para la eliminación de la materia orgánica, pues queda demostrado que es una importante barrera al paso de contaminantes, pero existe una pequeña fracción de materia orgánica a la que se debe controlar en su destino final.

3.3. Presencia de virus en el permeado

Son numerosos los estudios realizados en los cuales las membranas de ósmosis inversa han demostrado ser capaces de eliminar de las aguas tratadas diferentes tipos de microorganismos: bacterias, virus, parásitos y hongos (Iranpour, 1998; Madiredi *et al.*, 1997). No obstante, en algunos ensayos en los que se pretendía estudiar la integridad de las membranas, como único tratamiento, frente a distintas concentraciones de virus inoculadas en las aguas, se ha podido comprobar, y no con cierta estupefacción, la presencia de unidades virales en los efluentes (Gagliardo *et al.*, 2000). En estos ensayos en los que se pretendía estudiar la capacidad de desinfección de distintos tipos de membranas de microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa se inocularon muestras de agua con virus MS2 y se comprobó que las membranas de microfiltración conseguían entre 0,0 y 3,3 logaritmos de eliminación del virus, las membranas de ultrafiltración consiguieron hasta más de 6 logaritmos de rechazo. Pero sorprendentemente, los tres tipos de membranas de ósmosis inversa ensayadas (de tres fabricantes diferentes) sólo consiguieron entre 2,1 y 5,5 logaritmos de reducción en la concentración del virus MS2, dependiendo del tipo de membrana empleada. Dado que este tipo de sistema emplea membranas homogéneas no porosas, la existencia de partículas virales en el permeado no deja de ser algo sorprendente. No



Figura 3. En las estaciones orbitales donde se realizan prolongadas estancias existen sistemas para reciclar el agua hasta en un 80% del agua potable que consume la tripulación. En la imagen aparece uno de los tres circuitos de recuperación de agua que poseía la desaparecida nave MIR (lado izquierdo de la imagen).

obstante, en ningún caso se registró la presencia de coliformes fecales ni totales.

La explicación se debe a que el pequeño tamaño del virus le permite pasar a través de las irregularidades que presentan algunas membranas de ósmosis inversa en su superficie. Si bien estas irregularidades no son perceptibles desde el punto de vista del control del sistema (por ejemplo: el aumento en la conductividad del permeado) por su pequeño tamaño, sí son lo suficientemente importantes como para que los virus puedan aparecer en el permeado. Ello demuestra que es necesario profundizar en los sistemas de calidad en la fabricación de las membranas para asegurar la integridad de las mismas.

4. La reutilización potable indirecta y la protección de la salud pública

La posibilidad de poder introducir un agua regenerada (a partir de agua residual) en las fuentes de abastecimiento para aumentar las reservas de agua, obliga a contar

con sistemas de tratamientos lo suficientemente fiables que permitan que el fallo de alguna unidad, sea suplida por otra dentro de la misma secuencia de tratamiento. Esto es lo que se denomina tratamiento multi-barrera y trata de compensar "la menor calidad" de la fuente de origen del agua.

Además de los tratamientos multi-barrera de tipo tecnológico, existen en la reutilización potable indirecta procesos de mezcla y dilución a través de masas "naturales" de agua, que suponen nuevas barreras al paso de los contaminantes. Ello proporciona, además de un descanso psicológico para parte de una población muy sensibilizada, un tratamiento adicional al agua regenerada antes de su entrada en los sistemas de potabilización (otra barrera múltiple más).

Por último, es evidente que al agua tratada en las plantas de potabilización son sometidas a rigurosos análisis para garantizar su consumo. Todo este conjunto de barreras ha demostrado su eficacia a través de diversos estudios de salud en varios proyectos de demostración, en el que las aguas empleadas en esos proyectos resultaban ser, al menos tan seguras para su consumo como las aguas que se distribuían en las poblaciones de estudio. Así ha quedado demostrado en los relevantes proyectos realizados en Denver, Tampa y San Diego (Rogers y Lauers, 1992, McEwen *et al.*, 1997).

5. La reutilización potable indirecta y la legislación

El desarrollo e implementación de proyectos que empleen la reutilización potable indirecta forzosamente va a venir dada mediante la aplicación de la legislación más adecuada. Será esta la que dictamine en última instancia las condiciones en las que debe llevarse a cabo dicha actividad.

A continuación se repasan algunas legislaciones existentes de países o estados interesados en este tipo de reutilización.

Estados Unidos: no existe a nivel federal ninguna ley que regule la regeneración y reutilización de las aguas residuales, recayendo la responsabilidad de dicha regulación sobre los distintos estados, que o bien disponen de su propia normativa o bien han adaptado las regulaciones propuestas por la USEPA (USEPA, 1992), las cuales deben ser utilizadas como una guía, más que como normas.

El estado de California ha sido el pionero en emplear la reutilización de aguas como fuente adicional de aguas. Así, la primera aplicación de aguas residuales para reutilización planificada de la que se tiene constancia se realizó en la ciudad de Bakersfield, allá por el año 1912, para el riego de maíz, cebada, algodón y pastos. Posteriormente en 1918, el Estado de California estableció las primeras regulaciones para el riego con agua regenerada. Actualmente, existen nuevas normativas para la recarga artificial de acuíferos (reutilización potable indirecta) en los casos de extensión superficial o de inyección directa. En ambos casos se exige que el agua cumpla con los límites máximos de contaminantes de las aguas potables. En el caso de la recarga mediante extensión superficial el agua debe poseer dichas características tras atravesar la zona vadosa, y en el caso de la inyección directa los deberá alcanzar en el punto de inyección. Por el contrario, aún no existe una regulación para los proyectos de reutilización potable indirecta mediante el aumento de las reservas superficiales, aunque ya se han llevado a cabo proyectos de demostración como el de Lake Arrowhead (Madireddi *et al.*, 1997). En este caso, y ante la falta de legislación específica se recogieron los límites más exigentes de cuatro legislaciones distintas, entre ellas las de aguas potables, la de recarga de acuíferos, etc. En el Estado de Florida, la legislación para la reutilización potable indirecta es menos restrictiva que la

existente en California. No obstante, está prevista su revisión, mediante la cual será bastante parecida a la californiana.

Unión Europea: en la Unión europea existe una cierta inquietud ante la falta de unidad en la reglamentación de los distintos países relativa a la reutilización de aguas residuales. La única referencia relativa a la reutilización en la legislación europea es el artículo 12 de la Directiva Europea 91/271/EEC. Puesto que aún no existen estándares de calidad que unifiquen los criterios que se han de considerar para este tipo de reutilización, se está desarrollando una directriz que integre todas las normas y regulaciones empleadas en la UE, integrando para ello la Directiva IPPC (Integrated Pollution Prevention Control) y las normas BAT (Best Available Techniques).

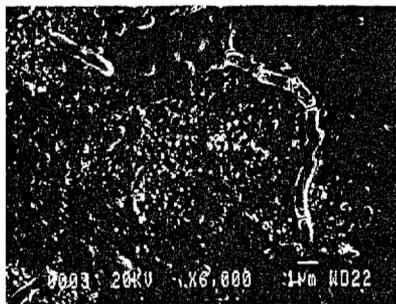


Figura 4. Micrografía electrónica de barrido SEM (x6.000) de una membrana de poliamida aromática probada en la planta piloto para la reutilización de aguas residuales urbanas en Chiclana de la Frontera, Cádiz, en la que aparece el material biológico y no biológico adherido.

España: aún no existe ningún tipo de legislación que regule este tipo de actividad. No obstante, se está empezando a emplear como prescripciones que deben cumplirse en proyectos de reutilización, desde el mes de abril de 2002 (BOE nº 102, de 29 de abril de 2002), la propuesta de calidades mínimas exigidas para la reutilización directa de efluentes depurados redactada por el CEDEX. Hasta entonces la legislación actual establecía que la recarga de acuíferos debía considerarse como un vertido al Domi-

nio Público Hidráulico, y no un tipo de reutilización. En casos especiales se podía permitir la recarga de acuíferos mediante la emisión favorable de los correspondientes informes hidrogeológicos, medioambientales y de salud de las autoridades responsables.

6. Los desafíos de la reutilización potable indirecta

No obstante, y a pesar de que diversos estudios han demostrado la inocuidad de este tipo de reutilización, algunos aspectos han de ser reorientados para que tanto los legisladores, como los políticos y el público en general estimen interesante y segura este tipo de actividad.

Desde el punto de vista práctico, uno de los aspectos que más inquietud provoca por su repercusión sobre la salud pública, es el desarrollo de una metodología adecuada para evaluar el riesgo microbiológico que ayude a establecer los criterios necesarios para la reutilización de las aguas regeneradas. Éste aspecto es clave para la gestión adecuada de este tipo de proyectos. Así, conviene redefinir, basándose en criterios científicos, qué se entiende por "riesgo aceptable" en la reutilización, o qué se entiende por "un indicador microbiano", y si el criterio adaptado es el más adecuado para representar el riesgo asociado a la salud del consumidor o está basado en términos de facilidad de operación y seguimiento.

Los beneficios que se obtendrían de este tipo de medida serían varios: ayudaría de forma importante a que el público, usuario final de las aguas regeneradas tenga una visión más segura de los programas, los legisladores tendrían herramientas sólidas para establecer el equilibrio óptimo entre la protección de la salud pública y los costes asociados al funcionamiento de los proyectos y, sobre todo, una base científica sólida que ayude a circunscribir aún más el riesgo microbiológico.

7. Conclusiones

La reutilización potable indirecta ha demostrado ser una actividad interesante para la gestión de los recursos hidráulicos, en las que una adecuada apuesta tecnológica y de evaluación garantizarán una mayor aplicación. Los diversos estudios de demostración llevados a cabo y otros en funcionamiento, en la actualidad, reconocen a la ósmosis inversa como la mejor tecnología disponible para alcanzar la calidad final de los efluentes regenerados. El grado tecnológico alcanzado supone un fuerte revulsivo hacia la implementación de proyectos de reutilización potable indirecta; no obstante, conviene examinar el destino final de los contaminantes que, aunque a muy baja concentración puedan aparecer en los efluentes tratados.

Por último, una mayor definición en los aspectos relativos a la legislación relacionada con la protección de la salud pública, contribuirían a darle mayor base científica a la reutilización, a la vez que para el público, destinatario final del agua, le resultaría más tranquilizador.

8. Bibliografía

- [1] ADIN A. Y ASANO, T. (1998). *The role of physical-chemical treatment in wastewater reclamation and reuse*, *Water Science and Technology*, Volume 37, Issue 10, 1998, Pages 79-90.
- [2] CAMPBELL, P.; SRINIVASAN, R.; KNOELL, T.; PHIPPS, D.; ISHIDA, K.; SAFARIK, J.; CORMARCK, T.; RIDGWAY, H. (1999). *Quantitative structure-activity relationship (qsar) analysis of surfactants influencing attachment of a Mycobacterium sp. to cellulose acetate and aromatic polyamide reverse osmosis membrane*. *Biotechnology and Bioengineering* 64, 5, 527-544.
- [3] ELIMELECH, M.; ZHU, X.; CHILDRESS, A.; HONG, S. (1997). *Role of membrane surface morphology in colloidal fouling of cellulose acetate and composite polyamide reverse osmosis membranes*. *Journal of Membrane Science* 127, 101-109.
- [4] GAGLIARDO, P.; ADHAM, S.; OLIVIERI, A.; TRUSSELL, R. (2000). *Evaluation of an integrated membrane system for water repurification*. Conference Preprint, Book No. 8. *Wastewater, Reclamation, Recycling and Reuse*. 1st World Water Congress of the International Water Association (IWA), July, 3-7, Paris.
- [5] IRANPOUR, R. (1998). *Virus removal by advanced membrane filtration for wastewater reclamation*. *Water Environment Research*, 70, 6, 1198-1204.
- [6] LEVINE, B.; REICH, K.; SHEILDS, P.; SUFFET, I.; LAZAROVA, V. (2000). *Water quality assessment for indirect potable reuse: to new methodology for controlling trace organic compounds at the West Basin Water Recycling Plant (California, USES)*. Conference Preprint, Book n° 8. *Wastewater, Reclamation, Recycling and Reuse*. 1st World Water Congress of the International Water Association (IWA), July, 3-7, Paris.
- [7] LITON, G. AND OLSON, T. (1994). *Colloid deposition kinetics with surface-active agents: Evidence for discrete surface charge effects*. *J. Colloid Interface Sci.*, 165, 522-526.
- [8] MCEWEN, B.; RICHARDSON, T.; SHEIKH, B. (1997). *Indirect potable reuse. A committee report of the AWWA Water Reuse Committee. Beneficiary Reuse of Water and Biosolids*. WEF Specialty Conference. April, Marbella, Spain.
- [9] MADIREDDI, K.; BABCOCK, R.; LEVINE, B.; HUO, T.; KHAN, E.; YE, Q.; NEETHLING, J.; SUFFET, I.; STENSTROM, M. (1997). *Wastewater reclamation at Lake Arrowhead, California: an overview*. *Water Environment Research*, 69, 3, 350-362.
- [10] ROGERS, S.; LAUERS, W. (1992). *Denver's demonstration of potable water reuse: water quality and health effects testing*. *Water Science and Technology*. 26, 7-8, pp1555-1564.
- [11] SONG, L. AND M. ELIMELECH, M. (1995). *Particle deposition onto a permeable surface in laminar flow*. *J. Colloid Interface Sci.*, 173, 165-180.
- [12] USEPA (1992). *Guidelines for Water Reuse*. EPA/ 625/ R-92/ 004, US. Environmental Protection Agency, Center for Environmental Research Information, Cincinnati, Ohio.
- [13] WIESSNER, M. AND CHELLAM, S. (1999). *The promise of membrane technology*. *Environ. Sci. Technol.* 33, 17, pp360A-366A.
- [14] WINFIELD, B. a (1979). *The treatment of sewage effluents by reverse osmosis-pH based studies of the fouling layer and its removal*. *Water Research*, 13, 561-564.
- [15] WINFIELD, B. b (1979). *A study of the factors affecting the rate of fouling of reverse osmosis membranes treating secondary sewage effluents*. *Water Research*, 13, 565-569.
- [16] ZHU, X. AND ELIMELECH, M. (1997). *Colloidal fouling of reverse osmosis membranes: measurement and fouling mechanisms*. *Environ. Sci. Technol.*, 31, 3654-3662.

