

## Resumen

La aplicación de la ósmosis inversa a la regeneración de aguas residuales es una actividad que provoca un gran interés, aunque en nuestro país aún no son demasiadas las experiencias que se han llevado a cabo. En la EDAR "La Barrosa" en Chiclana de la Frontera, Cádiz, se construyó en 1994 una planta piloto experimental (100 m<sup>3</sup>/día) para la reutilización de aguas residuales urbanas dotada de diferentes tratamientos avanzados, destacando especialmente entre ellos la ósmosis inversa. Desde entonces se han llevado a cabo en la planta numerosas experiencias empleando membranas de acetato de celulosa (Hydranautics) y distintos tipos de membranas de poliamida aromática de fabricación española (Pridesa). Cada tipo de membrana posee características operativas y requerimientos diferentes en el agua de alimentación que las pueden hacer idóneas para un determinado propósito. En este trabajo el efluente secundario, antes de llegar a la unidad de ósmosis inversa, es sometido a distintos tipos de tratamientos denominados como: *tratamiento intenso*, *tratamiento moderado* y *tratamiento mínimo*, lo cual influye en las condiciones de operación a las que se ven sometidas las membranas. Tras cada tipo de tratamiento se han realizado análisis de las aguas de entrada y de salida de la instalación que permiten evaluar la calidad del efluente final y la eficacia del tratamiento realizado. En todos las muestras de permeado analizadas se ha podido comprobar una magnífica calidad, prácticamente independiente del tipo de tratamiento efectuado. Asimismo se ha podido comprobar que las membranas de acetato de celulosa tienen una menor tendencia al ensuciamiento que la de poliamida aromática debido a su morfología superficial. No obstante, las de poliamida poseen una serie de ventajas que las hacen superiores a las anteriores, dado que las permiten ser usadas en un amplio tipo de aplicaciones y con un menor coste energético.

## Palabras clave:

Agua regenerada, ósmosis inversa, membrana, acetato de celulosa, poliamida, ensuciamiento, limpieza.

# Comparación del funcionamiento de membranas de ósmosis inversa de poliamida aromática y acetato de celulosa en la regeneración de efluentes secundarios

Por: López Ramírez, Juan Antonio; Carrasco Vega, Manuel; Sales Márquez, Diego; Quiroga Alonso, José María

Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente

Facultad de Ciencias del Mar y Ciencias 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

## Abstract

*A comparison of the performance of aromatic polyamide and cellulose acetate reverse osmosis membranes on the regeneration of secondary effluents*

The application of reverse osmosis in regenerating waste waters has aroused a great deal of interest, although relatively few experiments using this technique have so far been carried out in Spain. In 1994, an experimental pilot plant was built at the La Barrosa waste water treatment plant in Chiclana de la Frontera, in the province of Cádiz. This pilot plant, with a capacity of 100 m<sup>3</sup>/day, was equipped with various advanced treatments, most notably reverse osmosis, for treating urban waste waters for re-use.

Since this pilot plant was built, various experiments have been carried out employing cellulose acetate (Hydranautics) and different types of Spanish-made aromatic polyamide membranes (Pridesa). Each type of membrane possesses different operating characteristics and feed-water requirements making each one suitable for a particular purpose.

In this study, the secondary effluent was subjected to different kinds of treatment—called intense treatment, moderate treatment and minimum treatment—before reaching the reverse osmosis unit, which influenced the conditions in which the membranes operated. Following each type of treatment, the waters entering and leaving the installation were analysed to evaluate the quality of the final effluent and the effectiveness of the treatment carried out.

The quality was extremely good in all the permeate samples analysed, almost irrespective of the type of treatment applied. It was also found that the cellulose acetate membranes tended to become less dirty than the aromatic polyamide membranes, due to their surface morphology. Nevertheless, the polyamide membranes have various advantages allowing them to be used in a wide range of applications at a lower energy cost.

## Keywords:

Regenerating waste waters, reverse osmosis, membranes, cellulose acetate, polyamide, dirty, cleaning.

## 1. Introducción

En numerosos países la reutilización de las aguas residuales es una fuente adicional de recursos de agua, y como tal está incluida en la gestión integral del agua. En España, si bien el interés por dicho recurso es enorme, las acciones llevadas a la práctica son aun demasiado limitadas. La posible explicación puede hallarse en el escaso número de proyectos de demostración desarrollados y en la ausencia de un marco regulador específico para la reutilización segura de las aguas regeneradas.

De entre las distintas aplicaciones posibles que tienen las aguas residuales regeneradas destaca por su especial interés la recarga directa de acuíferos. Ésta exige una calidad muy elevada en el agua regenerada que se inyecta y un contenido de material disuelto especialmente bajo (Bouwer, 1996). Este tipo de aplicación permite, por un lado, recuperar los acuíferos salinizados, y por otro, aumentar las reservas de aguas subterráneas: Para conseguir tal ob-

jetivo a partir de agua residual tratada es necesario recurrir a la ósmosis inversa, lo cual permite obtener un agua de elevada calidad.

El uso de la ósmosis inversa ha resultado muy exitoso en aquellos proyectos en los que se la ha empleado y que han sido descritos hasta la fecha (Asano y Levine, 1995). No obstante, cuando se emplea la ósmosis inversa tras un tratamiento secundario hay dos problemas que deben ser controlados: la colonización de las membranas por microorganismos (Ghayeni, et al., 1998), y la deposición de sólidos en suspensión sobre las membranas (Elimelech et al., 1997). Ambos fenómenos ensucian la capa activa perjudicando seriamente el rendimiento de las unidades y además incrementan los costes del proceso. La colonización microbiana es particularmente importante cuando las membranas son de acetato de celulosa, puesto que se pueden generar daños irreversibles en las mismas. Si se usan membranas compuestas de poliamida los procesos de biodegradación

no tienen lugar, pero existe una mayor tendencia al ensuciamiento por las propias características de funcionamiento de estas membranas (Zhu and Elimelech, 1997).

El adecuado pretratamiento de los influentes, antes de entrar en la unidad de ósmosis inversa, es de vital importancia dado que permite la reducción de todos aquellos agentes perniciosos para el correcto funcionamiento de las membranas: los microorganismos, los sólidos en suspensión y la materia coloidal, de tal manera que hasta donde sea viable técnica y económicamente, las membranas sólo reciban agua con sólidos disueltos. Esto permite a las membranas trabajar en condiciones idóneas que extienden la vida útil de las mismas y hacen asumible económicamente el proyecto de regeneración de aguas residuales.

Partiendo de un efluente secundario, los pretratamientos que sufren las aguas residuales depuradas antes de su desalación suelen consistir en una eliminación de la materia orgánica (de características coloidales fundamentalmente) mediante procesos de coagulación-floculación-sedimentación, una eliminación de microorganismos mediante tratamientos de desinfección y un acondicionamiento químico necesario para el buen funcionamiento de las membranas. Puesto que la calidad de los efluentes secundarios no suele ser uniforme, resulta imprescindible determinar las condiciones óptimas de operación de las unidades de tratamiento físico-químico que se van a emplear como unidades de pretratamiento a la unidad de ósmosis inversa (Asano et al, 1991), por lo que los estudios a escala piloto resultan, hoy en día, todavía fundamentales, mientras no existan modelos matemáticos adecuados que predigan el ensuciamiento en las membranas de ósmosis inversa.

Desde un punto de vista económico el pretratamiento previo que deben sufrir las aguas antes de su entrada en las membranas de ósmo-

sis inversa supone un incremento en el coste del tratamiento final del agua. No obstante, el avance experimentado por las membranas de ósmosis inversa, especialmente en los últimos años que las hacen más permeables, más selectivas, más resistentes y más baratas podría llevar a pensar que es posible reducir, sin mermar las características del efluente para su reutilización, el nivel de pretratamiento necesario repercutiendo el coste de éste mediante la reposición de las membranas. Ante esta doble situación cabe plantearse la siguiente pregunta: *¿es preferible aumentar la protección de las membranas con un pretratamiento intenso antes de entrar en la unidad de ósmosis inversa, o por el contrario es preferible reducir el grado de este pretratamiento compensándolo con una mayor reposición de membranas?*

La cuestión anterior es una de las que es necesario resolver en aspectos relacionados con la reutilización de aguas y es analizada en el presente trabajo, en el que además, se presenta un estudio comparativo entre las características del funcionamiento de cada tipo de membrana empleado, los diferentes niveles de pretratamiento efectuados al efluente secundario y la calidad del permeado obtenido tras el uso de la ósmosis inversa.

## 2. Material y métodos

### 2.1. Descripción de la planta

La instalación en la que se han desarrollado los estudios es una planta piloto experimental (100 m<sup>3</sup>/día) para la reutilización de las aguas residuales urbanas ubicada dentro de la EDAR "La Barrosa" (10.000 m<sup>3</sup>/día), en Chiclana de la Frontera, Cádiz. Se construyó con el objetivo de llevar a cabo estudios de optimización para la obtención de un agua de alta calidad y perfectamente reutilizable a un coste razonable empleando tecnologías avanzadas de tratamiento. En la planta se han venido desarrollando desde su construcción estudios de regeneración de aguas residuales mediante tratamientos avanzados. El agua obtenida, de elevada calidad, se inyecta directamente en el acuífero de la zona.

La planta consta de cuatro módulos interconectados entre sí: módulo de decantación, módulo de filtración, módulo de ósmosis inversa y caseta de control y laboratorio. Está completamente automatizada y tiene una gran versatilidad y flexibilidad que le permite emplear o no las distintas unidades de tratamiento de las que consta. En la **Figura 1** aparece una vista general de la instalación. Además, dispone de la sufi-

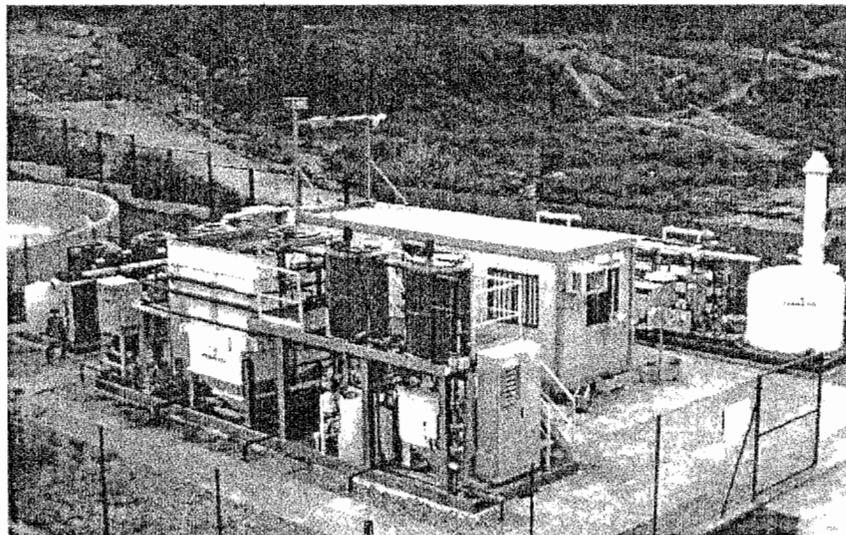


Figura 1. Vista general de la instalación.

ciente instrumentación en campo para llevar el control remoto de las variables de los distintos procesos: caudalímetros, pH-metros, conductímetros, indicadores de presión, termopares, etc. En la **Figura 2** aparece el diagrama de flujo de la instalación.

Las membranas de ósmosis inversa empleadas en los diferentes estudios han sido fabricadas por las empresas Hydranautics y por Pridesa. Las primeras eran de acetato de celulosa (modelo 4040-MSY-CAB2) y las segundas de poliamida aromática (Permetec BP y MBP) y polivinilalcohol (DC) están descritas un poco más adelante. Al objeto de evitar el deterioro rápido e irreversible de las membranas de la planta piloto experimental se ha construido otra planta piloto de ósmosis inversa de un caudal de 1,2 m<sup>3</sup>/día, en la misma instalación, con dos elementos de membranas de menor tamaño (25\*40), que permite la realización de estudios previos y con las condiciones a las que posteriormente se someterán las de mayor tamaño (**Figura 3**).

Las membranas de Pridesa estudiadas son de tres tipos:

- 1. Módulo PAC-4040-BP:** este tipo de membrana son las que corrientemente se encuentran en el mercado y se utilizan en plantas de agua salobre donde la salinidad del agua de aporte es superior a 2.000 µS/cm.
- 2. Módulo PAC-4040-MBP:** las condiciones de operación de este tipo de membranas requiere trabajar con presiones inferiores al módulo anterior, siendo la conductividad del agua de producto superior al módulo PAC-4040-BP.
- 3. Módulo PAC-4040-DC:** a diferencia de los módulos anteriores, la capa activa de esta membrana está formada por polivinilalcohol en vez de poliamida aromática. Su rechazo de cloruro sódico es bajo, sobre el 80%, pero sin embargo, su capacidad de rechazo para iones sulfatos y calcio se

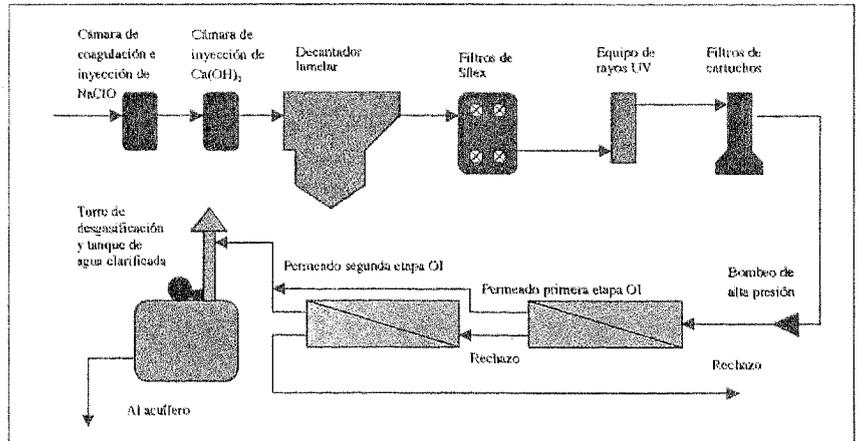


Figura 2. Diagrama de flujo de las secuencias de tratamiento empleadas.

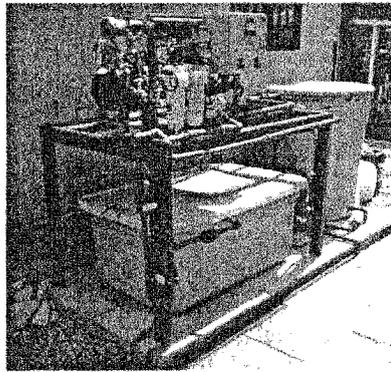


Figura 3. Vista de la unidad de ósmosis inversa de 1,2 m<sup>3</sup>/día para membranas de 25\*40 ubicada dentro de la planta experimental.

acerca al 99%. Son apropiadas por tanto, para bajar el contenido en sulfatos y dureza del agua a una presión de trabajo muy baja dada su alta permeabilidad.

En cada experimento se emplean cuarenta y dos elementos de membranas (40\*40) dispuestos en una doble etapa con un setenta y cinco por ciento de conversión y una producción nominal de 100 metros cúbicos por día, a menos que se indique lo contrario. Las membranas de acetato de celulosa fueron elegidas en primer lugar para estos experimentos por ser adecuadas para los usos con alta tendencia al ensuciamiento (Gerard et al, 1998), y además porque su superficie activa es lisa (Zhu y Elimelech, 1997). Por su parte, las membranas compuestas aunque poseen una mayor tendencia al ensuciamiento, requieren presio-

nes de trabajo inferiores, y poseen una permeabilidad superior y un mayor rechazo salino, lo que les otorga importantes ventajas frente a las de acetato de celulosa.

## 2.2. Tratamientos

Con el objetivo de estudiar el funcionamiento de las distintas membranas ante distintos tipos de calidad de agua de aporte, se aplicaron tres grados de tratamientos al agua que entraba en la unidad de ósmosis inversa los cuales se denominaron como: *tratamiento intenso*, *tratamiento moderado* y *tratamiento mínimo*, cuyas características se detallan a continuación.

- a) Tratamiento intenso.** Se aplicó un tratamiento avanzado convencional que consistió en: coagulación-floculación-sedimentación (lamelar) a alto pH utilizando para ello cal apagada, cloruro férrico y polielectrolito, filtración sobre arena de sílex, desinfección con hipoclorito sódico y por rayos ultravioletas, acondicionamiento químico (añadiendo un anti-incrustante y corrigiendo el pH con ácido clorhídrico), microfiltración de seguridad (5 micrómetros) y ósmosis inversa.
- b) Tratamiento moderado.** Se aplicó el mismo tratamiento que en el caso anterior, pero sin añadir cal. Ello tiene una serie de importantes repercusiones negativas sobre la sedimentación de los sólidos

en suspensión contenidos en el efluente secundario.

c) *Tratamiento mínimo.* En este tipo de tratamiento sólo se aplicó la sedimentación, la desinfección por cloración y rayos ultravioletas, la filtración en arena, la microfiltración de seguridad y la ósmosis inversa. Este tratamiento trata de mantener las condiciones mínimas requeridas para el adecuado funcionamiento de las membranas.

Previamente a la experimentación en planta se desarrollaron estudios de laboratorio de "jar test" que resultaron muy útiles para la determinación de las concentraciones más adecuadas para su empleo posterior en planta. Dichos ensayos permitieron establecer el valor de pH y las concentraciones óptimas de cloruro férrico, polielectrólito e hipoclorito sódico que fueron utilizadas posteriormente.

Después de cada tipo de tratamiento se llevaron a cabo análisis de las aguas de entrada y de salida de la instalación, de tal manera que pudiese ser evaluada la calidad del efluente final y la eficacia del tratamiento. El laboratorio permite la realización de análisis para el control y seguimiento diario de los procesos (pH, conductividad, turbidez, alcalinidad permanente y temporal, dureza cálcica, magnésica y total y cloruros). El resto de los análisis (análisis microbiológicos, DBO<sub>5</sub>, DQO, sólidos en suspensión, sulfatos, nitratos, nitritos, calcio, magnesio, fosfatos) se ha llevado a cabo en las instalaciones del Grupo de investigación de Tecnologías del Medio Ambiente en la Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales de la Universidad de Cádiz. Los diferentes parámetros estudiados en las muestras de aguas fueron analizados siguiendo los métodos normalizados para el análisis de aguas (APHA, AWWA, WPCF, 1992). Los valores de SDI (silt density index), parámetro que mide el atascamiento de un filtro de 0,45 micrómetros por los sólidos en suspensión conteni-

dos en un agua, fueron obtenidos utilizando la norma ASTM D 4189-95 (Standard Test Method for Silt Density Index (SDI) of Water). El tiempo transcurrido entre las dos mediciones fue siempre de quince minutos.

### 3. Resultados y discusión

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los distintos experimentos realizados en la planta piloto.

#### 3.1. Influencia de las características del agua bruta

Los efluentes secundarios se caracterizan por poseer elevados valores de materia orgánica, en comparación con otros tipos de agua para las que se emplea la ósmosis inversa como sistema de tratamiento o desionización (agua de mar, agua salobre de pozo, etc.), y junto con los sólidos coloidales en

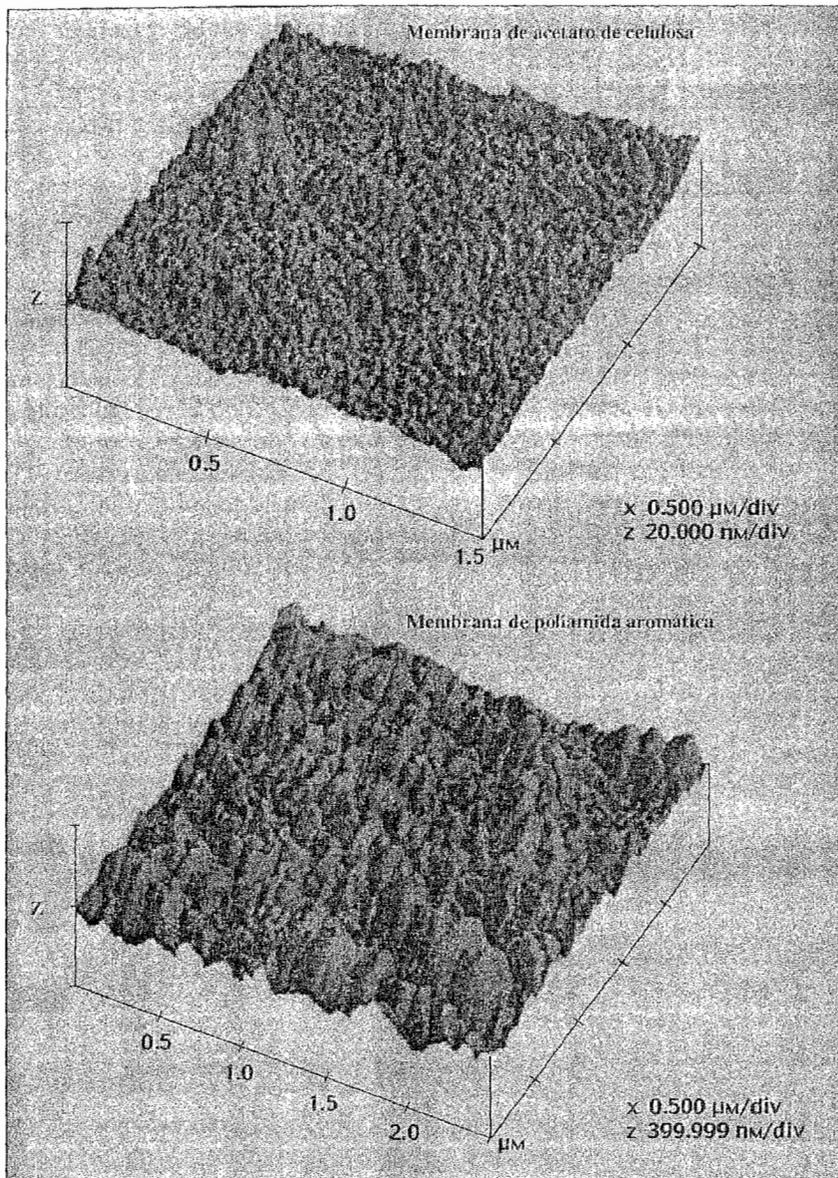
suspensión son los principales responsables del ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa.

La carga eléctrica que presentan las partículas coloidales a los valores de pH habituales en los efluentes secundarios suele ser negativa. Por su parte, las membranas de acetato de celulosa y poliamida aromática presentan características anfóteras debido a la presencia de grupos funcionales ácidos y básicos, siendo el punto isoeléctrico de las membranas de acetato de celulosa próximo a pH=3,5, y pH=5,2 para el caso de las membranas de poliamida. Esto implica que ambos tipos de membranas presenten carga negativa en sus superficies, por lo que entre las partículas coloidales y las membranas existe, en principio, una fuerza de repulsión que tienda a disminuir el ensuciamiento de las membranas. Sin embargo, y como consecuencia de las condiciones de operación en la uni-

Tabla 1

Parámetro	Membrana de acetato de celulosa	Membrana de poliamida aromática
	Agua de aporte	Agua de aporte
pH	8,03	7,6
Conductividad (µS/cm)	1,507	1,665
C.O.T. (mg C/L)	9,12	9,72
D.B.O. <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	16	13
S.S. (mg/L)	20	19
Turbidez (U.N.T.)	1,7	5,2
Sulfatos (mg/L)	127	205
Nitratos (mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /L)	135	80
Cloruros (mg/L)	226	343
Fosfatos (mg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /L)	6	13
Nitritos (mg NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /L)	0,22	1,02
Calcio (mg/L)	109	119
Magnesio (mg/L)	39	45
Coliformes Totales UFC/100 mL	3,2·10 <sup>5</sup>	6·10 <sup>5</sup>
Coliformes Fecales UFC/100 mL	4,1·10 <sup>3</sup>	3,2·10 <sup>3</sup>
Aerobias (22°C) UFC/mL	1,2·10 <sup>4</sup>	2,7·10 <sup>5</sup>

Tabla 1. Características del agua residual de entrada a la instalación para las membranas de acetato de celulosa y poliamida aromática. [Los datos presentados son la media de cinco análisis].



**Figura 4.** Imágenes de microscopía de fuerza atómica de las superficies de membranas de acetato de celulosa y poliamida aromática. Nota: La escala de los ejes "z" no es la misma para ambas; en el caso del AC es de 20 nanómetros y para la PA es de 400 nanómetros. Reproducido con el permiso de la American Chemical Society, Copyright 2001.

dad de ósmosis inversa, los coloides se acumulan sobre la superficie de las membranas y afectan negativamente tanto a la cantidad del flujo como a la calidad del permeado. Esta acumulación de coloides sobre la superficie de la membrana genera una resistencia hidráulica adicional al paso del permeado, lo que determina un descenso del flujo a través de las mismas. Teniendo esto en cuenta, las características fisicoquímicas del agua de entrada a una unidad de ósmosis inversa resultan fundamentales por

el efecto que pueden tener sobre las membranas. En la **Tabla 1** aparecen recogidas las características de las aguas de aporte utilizadas en el presente trabajo. Dada la excelente calidad de las aguas que se obtenían con el tratamiento a que eran sometidas en la EDAR, ha sido necesario, antes de su entrada en la planta piloto, mezclarlas en la proporción 85:15 con aguas procedente de la unidad de desarenado-desengrasado. Los resultados obtenidos se muestran en la citada tabla.

A la vista de los resultados puede establecerse que la calidad del efluente que entra en la planta piloto es homogénea en el tiempo, y de buena calidad. No obstante, esta EDAR en la época estival sufre algunas variaciones en el efluente, como consecuencia de la afluencia turística a la zona. La existencia de materia orgánica en el efluente, aún siendo baja si se la compara con otros tipos de efluentes, es lo suficientemente importante como para que con el paso del tiempo, generen problemas de ensuciamiento dado que como queda reflejado en la bibliografía, la materia orgánica disuelta juega un papel mucho más importante en el ensuciamiento de las membranas que los sólidos suspendidos de gran tamaño. Resulta, por tanto, fundamental, llevar a cabo un adecuado pretratamiento del agua de entrada a la unidad de OI.

### 3.2. Influencia de la estructura superficial de las membranas

Una característica que diferencia a las membranas de poliamida y a las de acetato de celulosa es la morfología de sus superficies. En el caso de las membranas compuestas, debido a su sistema de fabricación de polimerización interfacial, su superficie es extremadamente rugosa, con una fisonomía que recuerda a un paisaje "fuertemente montañoso". Por el contrario, las membranas de acetato de celulosa son extremadamente planas si se las compara con las de poliamida. En la **Figura 4** aparecen recogidas (con el permiso por escrito de la American Chemical Society, Copyright (2001), Zhu and Elimelech, 1997) unas imágenes de las superficies de las membranas de poliamida aromática y acetato de celulosa captadas mediante microscopía de fuerza atómica. Es importante destacar que en el caso de la membrana de acetato de celulosa la división correspondiente al eje "z" se corresponde con 20 nanómetros, mientras que en el caso de la poliamida aromática esta divi-

TRATAMIENTO TERCIARIO Y REUTILIZACIÓN

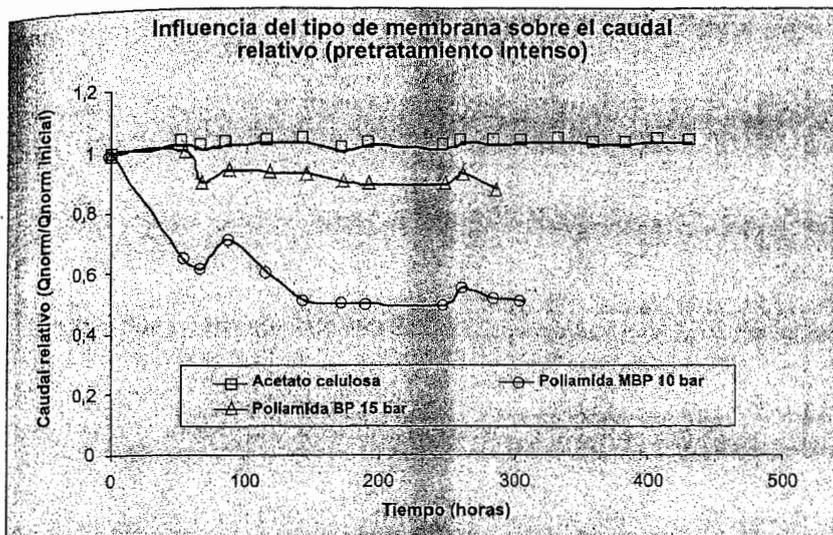


Gráfico 1. Influencia que ejerce el tipo de membrana sobre el caudal relativo en condiciones de pretratamiento intenso y en función del tiempo.

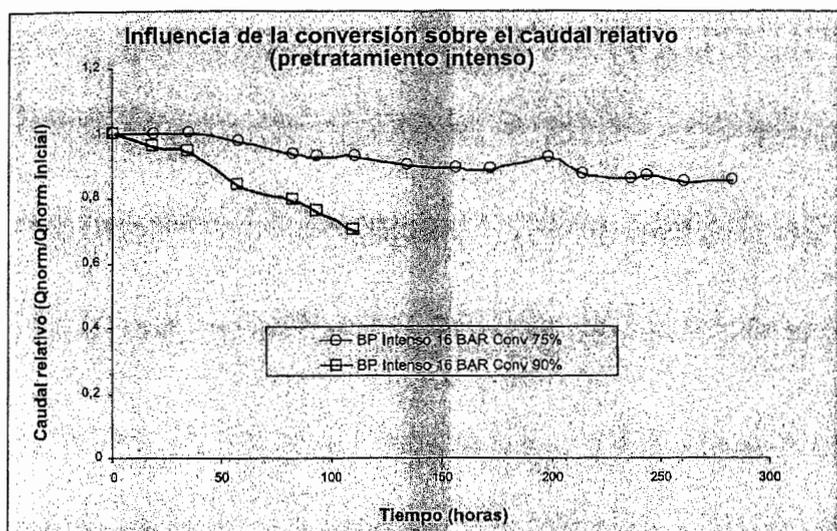


Gráfico 2. Influencia que ejerce el aumento de permeabilidad sobre el caudal relativo en condiciones de pretratamiento intenso y en función del tiempo.

sión alcanza los 400 nanómetros. Esto recalca la diferente morfología que existe a nivel superficial entre ambos tipos de membranas y que condicionan tan fuertemente el comportamiento frente al ensuciamiento coloidal de una sobre otra.

3.3. Influencia de las condiciones de operación

Al igual que el tipo de polímero y las interacciones que tengan con las partículas coloidales presentes en el agua de alimentación, las condiciones de operación influyen notablemente en el comportamiento de las membranas de una unidad de ósmo-

sis inversa. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la planta experimental con los distintos tipos de membrana.

En la Gráfico 1 se presenta la relación existente entre las características del tipo de membrana y su influencia sobre el caudal relativo (cociente entre el caudal normalizado y el caudal normalizado inicial) para los experimentos realizados con un tratamiento intenso de las aguas de aporte a los módulos de ósmosis.

En estas condiciones de operación, la calidad del agua de entrada a la unidad de OI es bastante homogé-

nea, debido al fuerte pretratamiento al que se ha sometido al agua. Por ello, predominan las interacciones entre las características de las membranas y la presencia de materia orgánica aún presente en el agua de alimentación tras los tratamientos previos. El descenso en la curva corresponde al desarrollo de ensuciamiento sobre la membrana. Los efectos de la temperatura y presión quedan anulados al comparar los caudales normalizados.

Para las membranas de acetato de celulosa no existe prácticamente ninguna variación en el caudal relativo durante el periodo de experimentación debido a, probablemente, su menor tendencia al ensuciamiento. En el caso de las membranas de poliamida, como consecuencia de su mayor tendencia al ensuciamiento debido a su morfología superficial, pero también a su mayor permeabilidad, aumenta la cantidad de coloides depositados sobre las membranas lo que se traduce en una reducción del flujo. Conviene recordar que en las condiciones ensayadas las membranas de acetato de celulosa producían 4,3 m<sup>3</sup>/h a 19 bares, mientras que las membranas de poliamida rendían BP: 5,66m<sup>3</sup>/h a 16 bares y las MBP: 6,0 m<sup>3</sup>/h a 10 bares de presión.

En la Gráfico 2 se presentan los resultados obtenidos al comparar la influencia que un aumento de la conversión (de 75% a 90%) tiene sobre el ensuciamiento de un mismo tipo de membrana. El aumento de la conversión implica un mayor paso de agua a través de la membrana, y puesto que la membrana es una superficie permeable se produce un acercamiento de los coloides y materia orgánica disuelta sobre la membrana que termina venciendo a la repulsión existente entre las cargas negativas de su superficie y las partículas coloidales, aumentando la concentración-polarización sobre la membrana. Como resultado final tiene lugar un ensuciamiento irreversible que prácticamente no es posible eliminar aún con fuertes

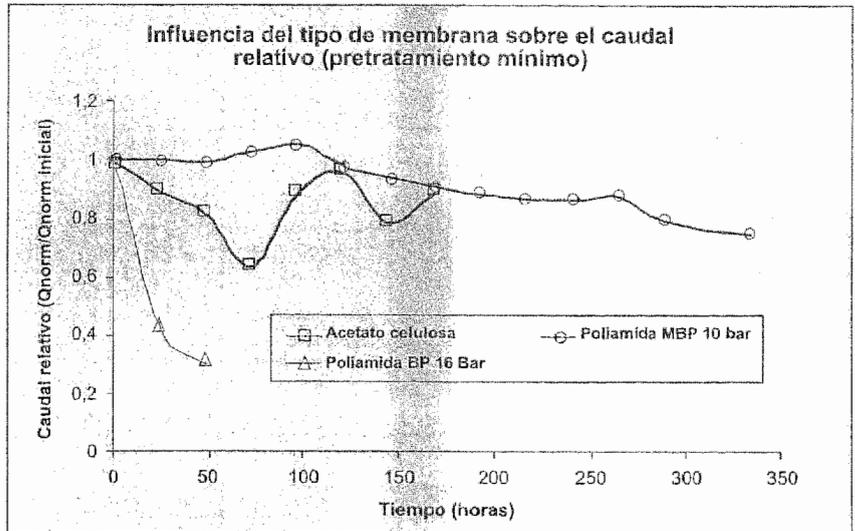
TRATAMIENTO TERCIARIO Y REUTILIZACIÓN

condiciones de lavado. Esta tendencia se acentúa en función de la mayor permeabilidad de una membrana sobre otra. La tasa de deposición coloidal sobre la superficie permeable está controlada, por tanto, por una interrelación entre la repulsión de las dobles capas eléctricas y la fuerza hidrodinámica que se le opone, resultante del flujo convectivo sobre las membranas. Esta fuerza hidrodinámica es proporcional al flujo de permeado y actúa perpendicularmente sobre la membrana venciendo la fuerza de la repulsión eléctrica que conduce finalmente a un acercamiento y deposición de los coloides sobre la superficie de la membrana.

En la **Gráfica 3** aparece representada la influencia que posee un pretratamiento mínimo sobre el caudal relativo. En este caso, y puesto que el tratamiento de las aguas de alimentación a la planta piloto es mínimo, la presencia de la materia coloidal en el agua de alimentación influye notablemente sobre el ensuciamiento final en todas las membranas estudiadas como lo prueban las rápidas pérdidas de caudal que se producen. En el caso de las membranas de acetato de celulosa, su comportamiento se puede explicar si se tiene en cuenta que, además del escaso tratamiento que tienen las aguas antes de entrar en la unidad de ósmosis inversa, el ensuciamiento se ve acentuado porque recibieron un agua de peor calidad durante unos días de verano, como consecuencia de problemas operacionales en la EDAR.

Se puede concluir, por tanto, que una elevada concentración de materia orgánica y materia coloidal en el agua de alimentación a la unidad de ósmosis inversa, tienen una influencia sobre la duración y el comportamiento de las membranas mayor aun que las propias características de las membranas.

Tras el funcionamiento de las membranas se realizaron autopsias a algunas de las membranas para establecer el alcance y naturaleza del



Gráfica 3. Influencia que ejerce el tipo de membrana sobre el caudal relativo en condiciones de pretratamiento mínimo y en función del tiempo.

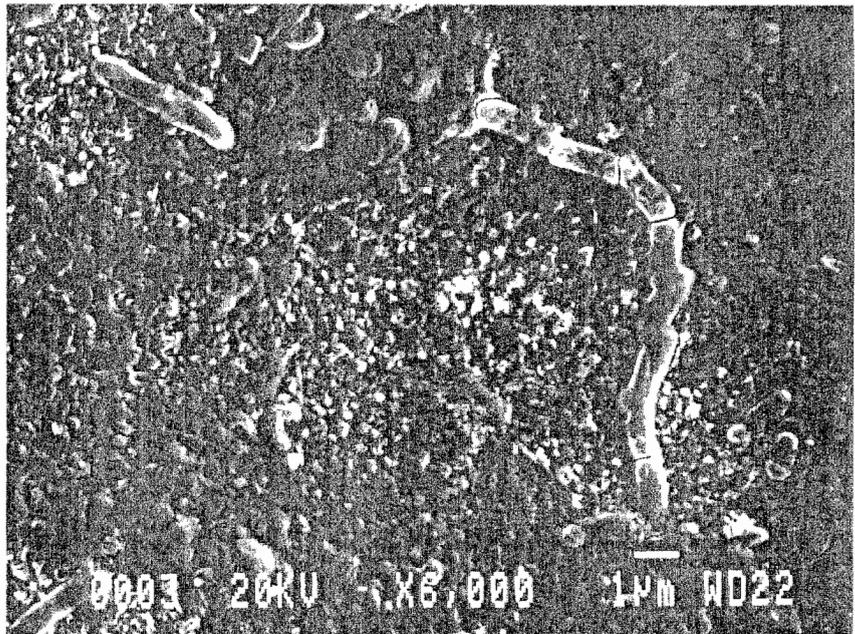


Figura 5. Micrografía electrónica de barrido de la superficie de una membrana de poliamida aromática (x6000).

ensuciamiento desarrollado sobre éstas. En las **Figuras 5, 6, 7 y 8** se muestran algunas de las múltiples micrografías electrónicas de barrido realizadas a las membranas de poliamida y a los espaciadores afectados por el ensuciamiento.

En la **Figura 5** aparece una imagen tomada de la superficie de una de las membranas de poliamida aromática (BP) después de haber estado sometida a duras condiciones de trabajo (tratamiento mínimo y altas

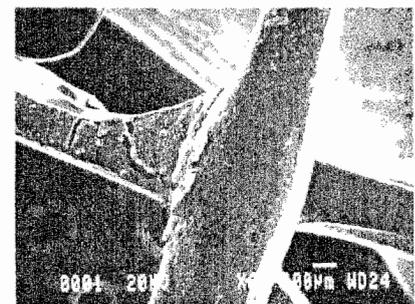


Figura 6. Micrografía electrónica de barrido de un espaciador y la capa de fouling generada en una de las intersecciones del material plástico (x65).

## TRATAMIENTO TERCIARIO Y REUTILIZACIÓN

conversiones). Se observan los microorganismos y el material depositado que aparece sobre su superficie.

En la **Figura 6** se muestra un espaciador y la capa de fouling generada en una de las intersecciones del material plástico. En esa zona se concentran la deposición de material orgánico y los microorganismos debido a que es una zona de cierto "remanso hidráulico".

En la **Figura 7** se muestran una zona con una especie de "valle" en la que se acumulan las bacterias al encontrar condiciones de baja agitación hidráulica. En la **Figura 8** aparece el grosor de la capa de fouling generada sobre el espaciador que llega a alcanzar hasta 3 micras.

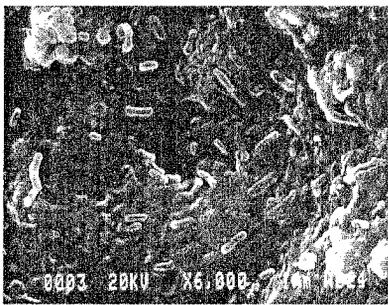


Figura 7. Micrografía electrónica de barrido de una zona de baja agitación hidráulica de un espaciador en la que se concentran los microorganismos y la materia orgánica (x6.000).

### 3.4. Calidad del agua de permeado

Para cada una de las distintas condiciones ensayadas, y al objeto de caracterizar la eficacia del tratamiento estudiado, se efectuó una analítica al agua de aporte y al agua destinada a la inyección en el acuífero. A partir de los resultados obtenidos es posible determinar el rendimiento de la planta en las condiciones de operación. Los parámetros determinados en el agua se presentan en la **Tabla 2** y en ella se puede apreciar como el agua producto presenta, en todos los casos, una elevada calidad que la hace que sea perfectamente reutilizable para un gran número de aplicaciones. Así, cabe destacar la ausencia de microorganismos en el efluente, lo que permite el empleo seguro por parte

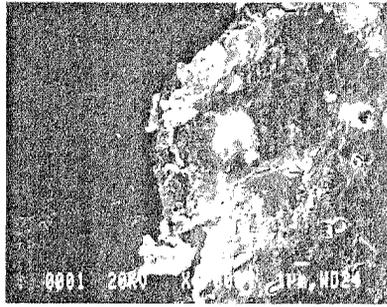


Figura 8. Micrografía electrónica de barrido de una capa de fouling sobre el espaciador (x6.000).

de los usuarios, incluido el riego de vegetales que se consumen crudos. El bajo contenido salino de este agua la hace muy útil para numerosos usos en los que la presencia de sales pueda afectar negativamente a la aplicación deseada. Los bajos valores en la conductividad alcanzados eliminan los problemas de toxicidad iónica específica habituales con el empleo de aguas regeneradas no desaladas. Los valores de mate-

ria orgánica encontrados en el efluente son asimismo especialmente bajos. Dado el origen doméstico de las aguas residuales, la posible presencia de contaminantes especialmente peligrosos queda minimizada en parte, aunque siempre existe la posibilidad de encontrar alguno. No obstante, la elevada capacidad de rechazo de las membranas supone una auténtica barrera al paso de éstos. Respecto a los nutrientes, las bajas concentraciones que aparecen en el efluente para su inyección directa, garantizan que no se van a producir fenómenos de eutrofización.

### 4. Conclusiones

A partir de los resultados presentados en este estudio pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1. La morfología de las superficies de las membranas de ósmosis

Parametro	ACETATO DE CELULOSA		POLIAMIDA AROMÁTICA BAJA PRESION	
	Agua de aporte	Agua producto	Agua de aporte	Agua producto
pH	8,11	6,98	7,90	7,42
Conductividad (µS/cm)	1.568	66	1.704	53
C.O.T. (mg C/L)	10,1	1,08	11,12	1,09
D.B.O. <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	15	—	13	—
S.S. (mg/L)	19,2	0,0	21,3	0,0
Turbidez (U.N.T.)	3,9	0,2	5,2	0,2
Sulfatos (mg/L)	143,7	5,1	186,8	3,5
Nitratos (mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /L)	119,2	18,5	61,7	7,9
Cloruros (mg/L)	243	9	305	6
Fosfatos (mg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /L)	5,65	0,03	11,02	0,12
Nitritos (mg NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /L)	0,20	<0,02	1,6	0,03
Calcio (mg/L)	136,1	4,6	135,2	2,9
Magnesio (mg/L)	28,9	1,0	37,2	0,7
Colif. Totales UFC/100 mL	8*10 <sup>5</sup>	No detectado	7*10 <sup>5</sup>	No detectado
Colif. Fecales UFC/100 mL	1*10 <sup>5</sup>	No detectado	6*10 <sup>4</sup>	No detectado
Aerobios (22°C) UFC/mL	9*10 <sup>4</sup>	No detectado	6*10 <sup>5</sup>	No detectado

Tabla 2. Analíticas realizadas al agua de aporte y al agua producto de inyección al acuífero con distintos tipos de membranas

inversa juega un gran papel en la deposición coloidal. En el caso de las membranas de acetato de celulosa al tratarse de una superficie prácticamente lisa el flujo tangencial consigue remover los sólidos que se depositan sobre las membranas. Por el contrario, este barrido superficial se ve fuertemente impedido en las membranas de poliamida por la presencia de grandes irregularidades superficiales en comparación con las partículas coloidales de pequeño tamaño que están presentes en el agua residual.

2. Las membranas de poliamida aromática tienen una permeabilidad superior a las de acetato de celulosa, y puesto que son sistemas permeables, se produce un acercamiento y deposición de las partículas coloidales hacia la membrana que supera ampliamente la fuerza de repulsión existente entre ambas cargas eléctricas negativas. Este fenómeno se ve agravado por la dificultad en el barrido del flujo tangencial.

3. El empleo de una alta conversión supone un rápido y, en la mayoría de las ocasiones, irreversible ensuciamiento de las membranas. Por este motivo resulta conveniente trabajar a conversiones moderadas, o bien aumentar la superficie disponible de membranas si es necesario aumentar la producción de la unidad.

4. Un buen pretratamiento resulta fundamental para el correcto funcionamiento de las membranas, y aún así éstas tenderán a ensuciarse, aunque en menor medida. En este sentido un adecuado sistema de limpieza ayuda a que un sistema de membranas de ósmosis inversa pueda permanecer operativo durante un largo periodo de tiempo. Con ambas actuaciones se puede asegurar el correcto funcionamiento de un proyecto de regeneración de aguas residuales que emplee la ósmosis inversa.

### 5. Agradecimientos

Queremos agradecer la colaboración de Pridesa en la realización de este trabajo, y en especial a Santiago Sahuquillo Paul, miembro del equipo de I+D de la citada empresa.

### 6. Bibliografía

- [1] APHA, AWWA, WPCF, (1992) Standard methods for examination of water and wastewater, 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- [1] Asano, T.; Richard, D.; Crites, R. W.; Tchobanoglous, G. (1991). Evolution of Tertiary Treatment Requirements in California. *Wat. Environ. and Tech.* 4, 2.

- [1] Asano T.; Levine. A. (1995). Wastewater reuse: a valuable link in water resources management. *Water Quality International*, 4, 20-24.
- [1] Bouwer, H. (1996). Issues in artificial recharge. *Water Science and Technology*. 33, 10-11, 381-390.
- [1] 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.
- [1] Gerard, R.; Hashisuka, H.; Hirose, M. (1998). New membrane developments expanding the horizon for the application of reverse osmosis technology. *Desalination*. 119, 47-55.
- [1] Ghayeni, S.; Beatson, P.; Schneider, R.; Fane, A. (1998). Adhesion of wastewater bacteria to reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science* 138, 29-42.
- [1] Zhu, X. and Elimelech, M. (1997). Colloidal fouling of reverse osmosis membranes: measurements and fouling mechanisms. *Environmental Science and Technology*. 31, 3654-3662.