

Regeneración de aguas residuales urbanas con **Tecnología de membranas**

El creciente desarrollo de las sociedades humanas lleva aparejado un continuo aumento en los consumos de agua. La utilización de ésta en los diferentes campos: urbano, industrial y agrícola, lleva consigo la incorporación de unos niveles de contaminación que se pueden considerar alarmantes, ya que la recepción de estas aguas en los cauces naturales, ríos, lagos y mares, producen una serie de trastornos y daños medioambientales, que afectan gravemente a su flora y fauna, además de producir molestias en los usos recreativos, económicos y paisajísticos que hacemos de ellos.

Los vertidos de aguas residuales, bien por su volumen, bien por su carga contaminante, o por ambos a la vez, han recibido especial atención en los últimos años y se han desarrollado múltiples investigaciones a su alrededor, lo que ha creado toda una actividad industrial y comercial en torno a la gestión, depuración y en la actualidad, a la reutilización de las aguas. Esta creciente actividad viene motivada por la reglamentación ambiental de los países desarrollados quienes, legislativamente, obligan a cumplir una serie de niveles de calidad en los vertidos efectuados por el que contamina o al que gestiona la contaminación generada por otros. Así pues, la cada vez más exigente reglamentación, no sólo está consiguiendo vertidos más suaves con respecto al medio ambiente, sino que estos vertidos pueden llegar a ser incluso reutilizables, debido a la calidad del agua lograda con los tratamientos. La reutilización de las aguas residuales se muestra entonces, como una de las mejores formas de afrontar el problema de los vertidos e incluso de la escasez de agua, allá donde se realice (1).

La creciente y acuciante sequía experimentada por los países mediterráneos, especialmente agravada en la zona andaluza, llevaron a la *Dirección General de Calidad de las Aguas* al estudio de sistemas de regeneración de aguas residuales urbanas para su completa reutilización, que dieron como fruto la construcción de esta planta experimental. Esta instalación modelo en su categoría, debe servir para probar diferentes unidades de tratamiento, y distintas disposiciones de los elementos para la optimización económica de los procesos seleccionados. Esta planta está construida con los sistemas de tratamiento terciario más avanzados del momento y más innovadores, como puede ser ozono, rayos ultravioletas,

Resumen de la ponencia presentada por los autores en el V Congreso Nacional de Medio Ambiente. Bilbao 10-13 marzo

**J. A. LÓPEZ-RAMÍREZ,
J. M. QUIROGA,
D. SALES**

Dept. de Ing. Química, Facultad de Ciencias del Mar, Universidad de Cádiz. Puerto Real, Cádiz.

J. IGLESIAS

Dirección Gral. de Calidad de las Aguas, Min. del Medio Ambiente.

S. SAHUQUILLO

Proyectos, acondicionamiento y servicios del agua, S.A., Barcelona

microfiltración, ósmosis inversa... En concreto, esta última unidad de tratamiento es la que se presenta como más innovadora en este campo, ya que son contadas las experiencias mundiales en este tipo de aplicaciones y las realizadas tienen como punto de referencia preferente a los Estados Unidos "Water Factory 21", "Denver"...(2).

En el marco del contrato de investigación y colaboración suscrito entre el *Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente de la Universidad de Cádiz* y la empresa *Proyectos, Acondicionamiento y Servicios de agua S.A.*, perteneciente a *PRIDESA* y ubicada en Barcelona, se han realizado diferentes investigaciones en la primera planta piloto experimental de aguas residuales urbanas mediante ósmosis inversa construida en España. La finalidad de dicho contrato radicaba en la optimización de dicha planta para la obtención de un agua reutilizable de máxima calidad a partir de los efluentes de la EDAR "La Barrosa" (*Chiclana de la Frontera, Cádiz*) donde se halla ubicada la planta piloto.

La reutilización de las aguas residuales es un campo de actuación prioritaria y de interés creciente día a día, dada la necesidad de conservar y mejorar nuestros recursos hídricos. En este sentido la finalidad del presente trabajo, consistió en abordar la optimización y la viabilidad técnica de los tratamientos terciarios avanzados con tecnologías de membranas, para su aplicación a la reutilización de aguas residuales urbanas, utilizándose para ello una planta piloto experimental. Los procesos desarrollados en estos estudios de regeneración han sido los siguientes: coagulación, desinfección, decarbonatación con cal, floculación, decantación, filtración en sílex, irradiación por rayos ultravioletas, microfiltración, separación de componentes por ósmosis inversa, desgasificación...

La tarea desarrollada ha sido muy

amplia, debido a la multitud de procesos implicados, y a la especial complejidad de algunos de éstos, mostrándose en este trabajo tan solo una pequeña parte.

PLAN DE TRABAJO

El esquema de trabajo llevado a cabo, consistió en primer lugar, en estudiar en ensayos de laboratorio los reactivos y concentraciones más convenientes para su empleo en la planta, de acuerdo con las características del efluente a tratar. Para ello, se procedió a utilizar los denominados "jar tests", ensayos de mezcla completa en vasos de precipitado, donde se estudian los comportamientos de los reactivos que se han de probar con las aguas a tratar, y en los que se simulan los procesos de coagulación y floculación que después se desarrollarán en el decantador a escala real. A partir de los resultados de laboratorio, se procedió a optimizar el funcionamiento de la planta desde un punto de vista económico, reduciéndose al mínimo las dosificaciones encontradas como óptimas. Este paso resulta fundamental, pues este factor, el económico, será en definitiva el que permita la aplicación de este tipo de tratamiento de forma industrial a gran escala una vez superados los inconvenientes técnicos.

El agua influente a la planta piloto ha pasado previamente por un tratamiento de lodos activos, y una posterior filtración en sílex, pero aún así, la contaminación microbiana se puede considerar como alta, por lo que resultaba imprescindible desinfectar convenientemente este agua, por el perjuicio que podían provocar los microorganismos sobre las membranas de acetato de celulosa de la unidad de ósmosis inversa, que son degradadas por éstos (3).

PLAN DE TRABAJO EN EL LABORATORIO

El proceso de trabajo desarrollado consta de las siguientes etapas:

- Estudio de la influencia de distintas concentraciones de un coagulante comercial (FeCl_3) en la decantación.
- Estudio de la influencia de la cal (Ca(OH)_2) en la decantación y búsqueda del valor óptimo de pH para la decarbonatación y desendurecimiento del agua de aporte.
- Estudio de la presencia y concentración del floculante en la optimización de la decantación.
- Búsqueda de la dosis de cloro libre residual que pueda garantizar la desinfección empleando hipoclorito sódico (NaClO).

PLAN DE TRABAJO EN LA PLANTA

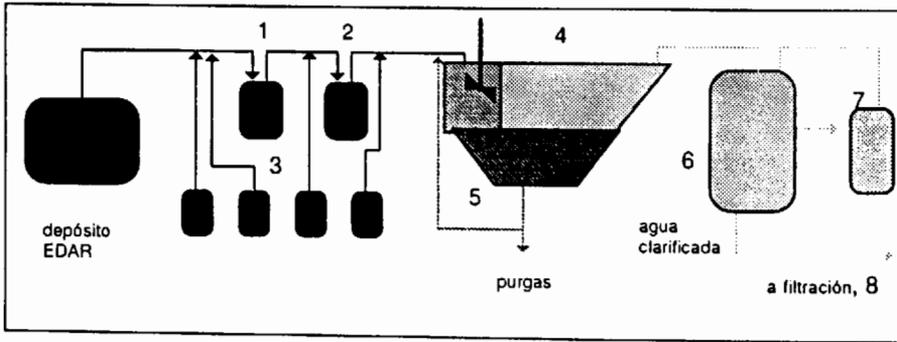


Fig. 1 - Esquema del módulo de decantación.

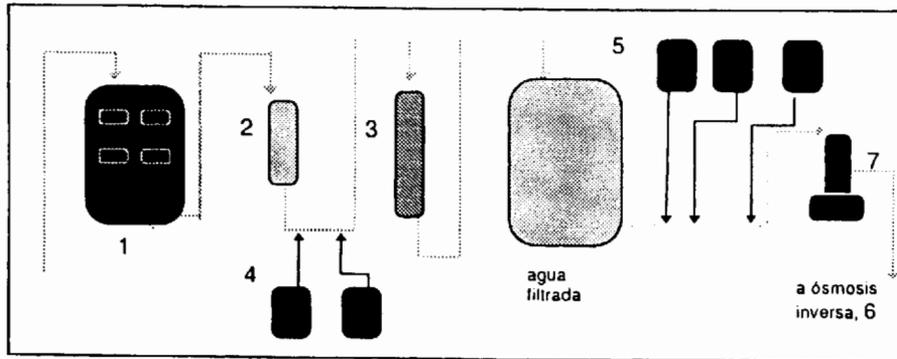


Fig. 2 - Esquema del módulo de filtración.

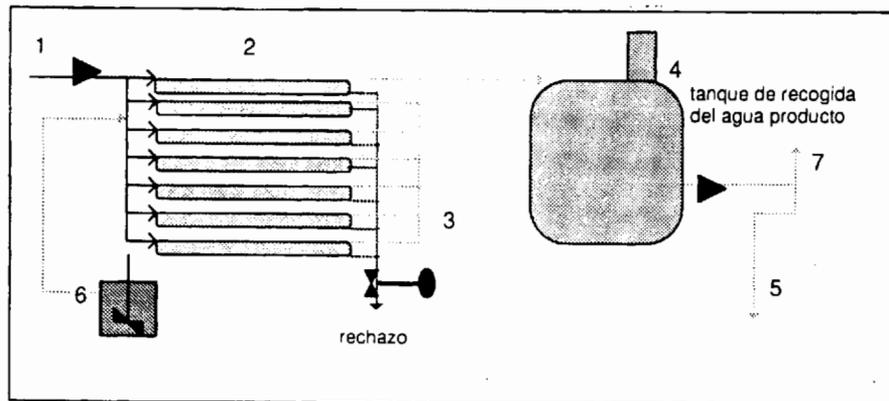


Fig. 3 - Esquema del módulo de ósmosis inversa.

Variación de la turbidez frente a la concentración de cloruro férrico.

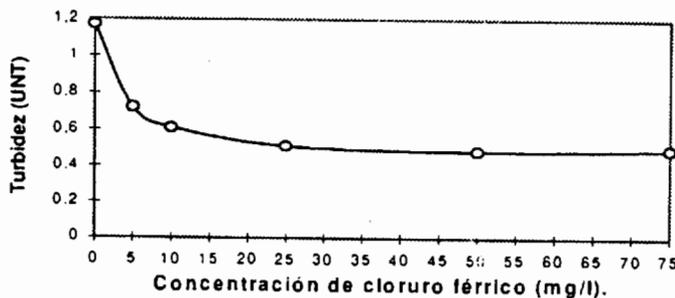


Fig. 4 - Representación de la variación de turbidez, frente a la concentración de cloruro férrico añadido al agua de entrada en la planta piloto.

Se describen a continuación las líneas de trabajo seguidas tanto en los módulos de decantación, filtración y ósmosis inversa.

Decantación

- Validación de las dosis del coagulante, obtenidas en el laboratorio como

óptimas, y optimización económica de la decantación en la medida de lo posible.

- Validación de la influencia de la cal en la decantación y búsqueda del valor óptimo económico de pH, para la descarbonatación y desendurecimiento del agua de aporte.
- Validación y optimización económica

de la concentración del floculante en la decantación.

- Validación y optimización de la dosis de cloro libre residual que garantice la desinfección en la planta empleando hipoclorito sódico (NaClO).

Filtración

- Estudio de la evolución de la duración de los filtros de seguridad de 5 micras.
- Estudio de la duración del ciclo de trabajo de los filtros de sílex.

Ósmosis inversa

- Seguimiento del funcionamiento de las membranas de la unidad de ósmosis inversa.

Material

Para la realización de la parte experimental se ha dispuesto de una planta piloto experimental de propiedad de la Dirección General de Calidad de las Aguas. Dicha planta está concebida para poder estudiar el tratamiento avanzado de efluentes, con la posibilidad de combinarlos de diferentes formas, y definir así, la secuencia óptima. La planta es capaz de tratar un caudal de 100 m^3 al día y está dotada de la más moderna tecnología y con la automatización y control más sofisticado del momento, con el fin de poder obtener una gran versatilidad que permita un estudio profundo del proceso. La reutilización del agua regenerada consiste en la inyección al acuífero de la zona, de donde se abastece diversas urbanizaciones y un campo de golf.

La planta piloto experimental para la reutilización de las aguas residuales urbanas consta de cuatro módulos autotransportables en camión, interconectados entre sí por las conducciones y cables necesarios:

- Módulo de decantación o de pretratamiento.
- Módulo de filtración.
- Módulo de ósmosis inversa.
- Caseta de control y laboratorio.

MÓDULO DE DECANTACIÓN.

Este módulo es el encargado de recibir las aguas que se van a procesar y regenerar. Consta de los siguientes equipos. Ver Figura 1.

- Tanque de coagulación (1).
- Tanque de precipitación (2).
- Equipos de dosificación automática de los distintos reactivos empleados (3).
- Decantador de lamelas, con cámara de floculación y zona de recogida de

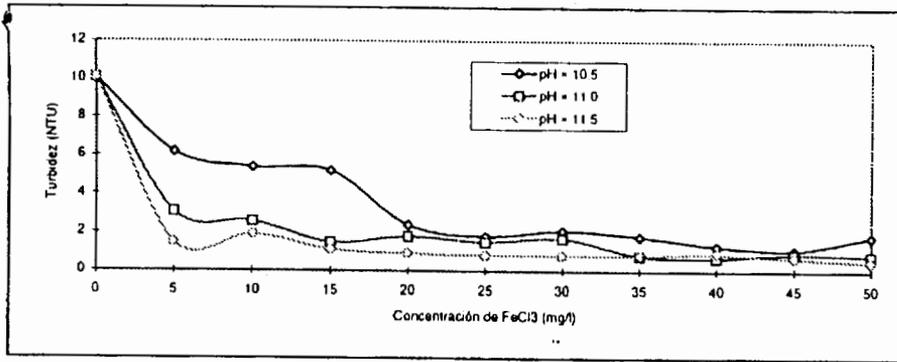


Fig. 5 - Representación de la eliminación de turbidez, frente a la concentración de cloruro férrico añadido a diferentes pH's.

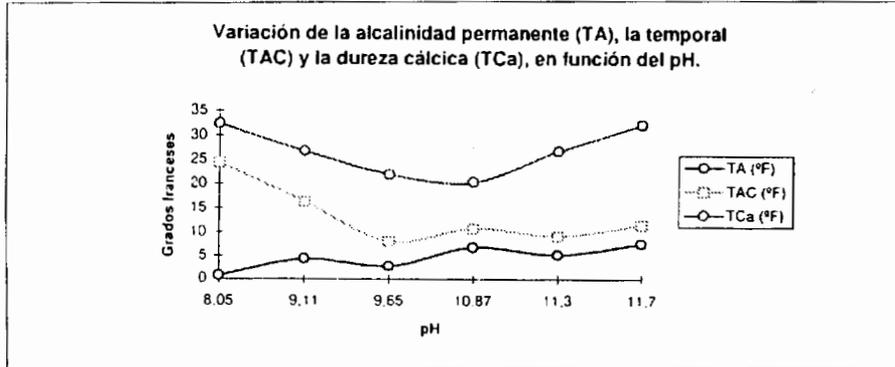


Fig. 6 - Variación en el agua de aporte de la dureza permanente (TA), temporal (TAC) y cálcica (TCa) a diferentes pH's.

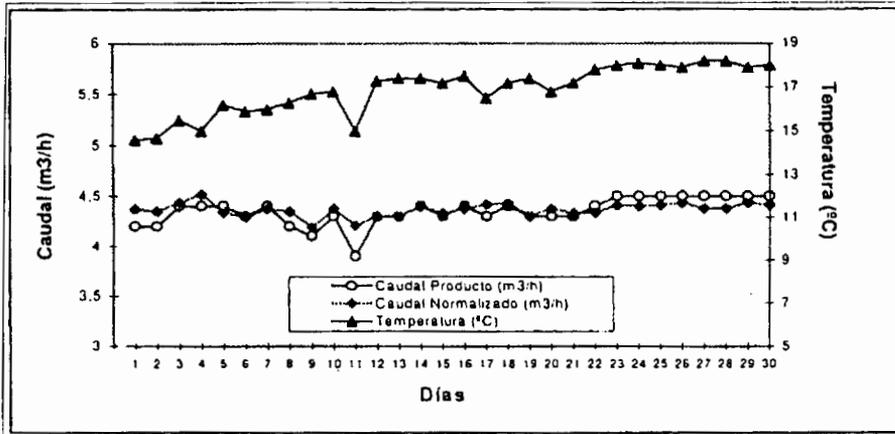


Fig. 7 - Representación del caudal producto y caudal normalizado y la temperatura frente a los días de operación.

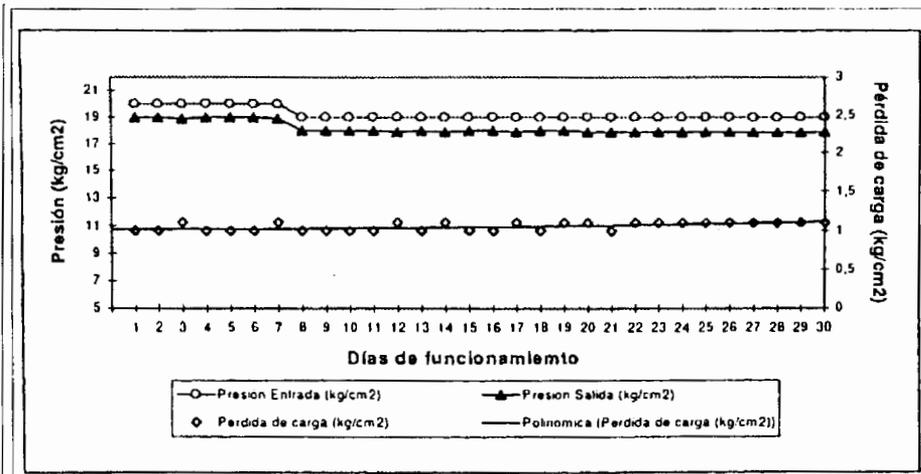


Fig. 8 - Representación de las presiones empleadas en el agua de aporte a la unidad de ósmosis inversa, y la presión de salida del rechazo, además de la pérdida de carga, frente al tiempo de operación.

fangos (4).

- Bombas de recirculación de fangos y purga temporizada de éstos (5).
- Tanque de recogida del agua clarificada (6).
- Equipo generador de ozono y cámara de contacto de éste con el agua (7).
- Equipo de bombas para el transporte del agua clarificada al módulo de filtración (8).

MÓDULO DE FILTRACIÓN

Este módulo, ver Figura 2, es el encargado de los procesos de filtración de las aguas que llegan de procesos anteriores. Consta de:

- Tres filtros de sílex, con la posibilidad de convertirse en filtros multimedia (1).
- Un equipo de rayos ultravioletas para la desinfección de las aguas (2).
- Dos filtros de precapa (3) y los equipos de dosificación necesarios (4).
- Tanque de recogida del agua filtrada. Equipos necesarios para el acondicionamiento del agua filtrada a la unidad de ósmosis inversa (5).
- Equipo de bombeo del agua filtrada al módulo de ósmosis inversa (6).
- Dos equipos de filtración, de seguridad de 5 micras (7).

MÓDULO DE ÓSMOSIS INVERSA

Los anteriores módulos acondicionan el agua de aporte para su entrada en el módulo de ósmosis inversa, que es el encargado de la desalación, ver Figura 3. Consta de:

- Equipos de medida y control de los principales parámetros de operación: caudales, temperaturas, conductividades, cuentarrevoluciones de las bombas, potenciales redox, pH, prestatos, indicadores de presión, indicadores de apertura y cierre de válvulas (finales de carrera), medidores diferenciales de presión en cada etapa...
- Cuatro bombas centrífugas multietapa de alta presión (boosters) (1).
- Un equipo de rayos ultravioletas para la desinfección de las aguas (2).
- Dos filtros de precapa (3) y los equipos de dosificación necesarios (4).
- Tanque de recogida del agua filtrada. Equipos necesarios para el acondicionamiento del agua filtrada a la unidad de ósmosis inversa (5).
- Equipo de bombeo del agua filtrada al módulo de ósmosis inversa (6).
- Dos equipos de filtración, de seguridad de 5 micras (7).
- Siete contenedores en configuración de membranas enrolladas en espiral, con un total de cuarenta y dos membranas de acetato de celulosa en su interior (2). Las membranas han sido fabricadas por la marca *Hidranautics*, modelo 4040-MSY-CAB2.
- Válvula de control de rechazo (3) y válvula de control de permeado.
- Torre de desgasificación, con ventilador para el arrastre de volátiles y CO₂ (4).

- Equipo de presión para la inyección en el acuífero del agua regenerada (5).
- Equipo de limpieza de membranas (6).
- Equipos de presiones para el servicio de agua en la planta de inyección en el acuífero (7).

Caseta de control y laboratorio.

La caseta está dotada de una oficina donde se realiza el control sobre la planta, un pequeño laboratorio para determinaciones sencillas y rutinarias, y un aseo. El control informático de todos los instrumentos y equipos se realiza a través de un control distribuido *Yokogawa μ XL*. La visualización y operación del sistema se efectúa en un centro de operación local (*LOC 2500*), con pantalla de color 19", teclado de membrana de operación y de ingeniería, y paquete electrónico para comunicación, procesado y almacenamiento de datos en disco duro y flexible. El centro de operación local *LOC 2500* dispone también de puerta de comunicación (modem) a ordenadores externos tipo PC, en los que se puede tratar la información recogida, o bien, correr programas especiales de aplicación. Los ordenadores que pueden acceder a esta información son dos; uno se encuentra en la delegación de la empresa *Proyectos, Acondicionamiento y Servicios del Agua, S.A.* en Barcelona y el otro, se encuentra en la sede de la *Dirección General de Calidad de las Aguas* en Madrid, que recibe los datos desde la delegación de la empresa en Barcelona.

RESULTADOS DE LABORATORIO

El primer estudio efectuado en el laboratorio consistió en la búsqueda de la concentración óptima de cloruro férrico, mediante los ensayos de *jar test*. En la Figura 4 aparece recogida la evolución de la turbidez (medida en UNT) frente a la concentración de cloruro férrico añadido al agua influente de la planta. Se puede decidir que la concentración óptima de cloruro férrico se sitúa en torno a los 25 mg/l de coagulante, sin que se produzca mejora alguna en la eliminación de turbidez, a partir de dicha concentración.

En la Figura 5 se representa la influencia del pH y de la concentración de cloruro férrico añadido en la eliminación de turbidez.

Se observa que cuanto mayor es el pH tanto menor es la concentración necesaria de coagulante para producir el mismo efecto. También es de destacar, que a partir de la concentración de cloruro férrico de 25 ppm apenas si se mejora la eliminación de turbidez en todos los casos. El beneficio que ofrece un agua descarbonatada está en que los bicarbonatos eliminados en el decantador jamás podrán precipitar en la unidad de ósmosis inversa, que, como se sabe, es un proceso de desalación de agua y de concentración de sales, con el consiguiente peligro que ello representa. Esta reducción de

bicarbonatos no sólo llevará a la unidad de ósmosis inversa a una reducción de las incrustaciones, sino que reducirá los problemas de ensuciamiento por parte de la materia coloidal, por la sinergia existente entre el coagulante empleado y la cal en la mejora de la decantación (4).

Por último, se representa otro ensayo de *jar test* Figura 6, en el que se observa la variación de la dureza cálcica y alcalinidades temporales y permanentes del agua, en función de la cal añadida y el pH logrado.

Como se puede observar, existe un mínimo en la dureza cálcica cuando se tiene un pH aproximado a 10.5. De forma parecida, ocurre con la alcalinidad temporal (los bicarbonatos en estas aguas). Debido a fenómenos de precipitación de los carbonatos generados a estos pH's (5).

Como conclusión de estos ensayos, se puede concluir que la concentración óptima de cloruro férrico es de 25 ppm, y el pH óptimo de descarbonatación es de 10.5. Además de estos estudios se realizaron otros para la determinación de la concentración óptima de floculante y de hipoclorito sódico, obteniéndose los valores de 1 ppm de floculante aniónico y de 4 a 9 ppm del desinfectante.

RESULTADOS EN LA PLANTA

Las condiciones obtenidas como óptimas en los ensayos de laboratorio se probaron en la planta y fueron modificadas con el fin de lograr la optimización económica. Las concentraciones de reactivos ensayadas fueron las siguientes: 15, 20 y 25 ppm de cloruro férrico, el pH varió desde 10 a 12 unidades, y la concentración de floculante aniónico se bajó a 0.5 ppm. El hipoclorito sódico tenía que ser modificado en función de la demanda de cloro del agua de entrada, pero su intervalo de aplicación oscilaba entre 7 y 9 ppm, de tal forma que siempre existiera una concentración de cloro residual de 0.5 ppm.

En las Figuras 7 y 8, se representan datos correspondientes a la unidad de ósmosis inversa, durante toda la fase de optimización de la decantación, que incluyen, todas las modificaciones realizadas a las concentraciones encontradas como óptimas en el laboratorio. En concreto, en la Figura 7, se representan las evoluciones de los caudales de agua producto y normalizado para diferentes concentraciones de cloruro férrico y pH's. La representación del caudal producto y el normalizado, permiten la comparación del funcionamiento de las membranas en cualquier momento, con una temperatura de referencia (15°C), pues las variaciones de temperatura ambiente producen modificaciones en el flujo de agua producto, y pueden inducir a errores, al aumentar o disminuir la viscosidad del agua.

Como se puede apreciar en la Figura 7, no existe pérdida de caudal producto, sino al contrario, un ligero aumento en la producción, debido al aumento de temperatura ambiente. Observando el caudal normalizado

cabe pensar, al permanecer éste constante, que no existen, ni ensuciamiento ni incrustaciones en las membranas que reduzcan el flujo, lo que implica un buen funcionamiento del sistema.

En la Figura 8 aparece la representación de las presiones empleadas y la pérdida de carga, en la que apenas puede apreciarse aumento de ésta última, por lo que se puede desechar la existencia de ensuciamiento o incrustaciones en las membranas, que serían delatadas por un aumento de la presión de trabajo, además, de un descenso en el caudal de agua producto, que como queda demostrado en la Figura 7 no existe.

CONCLUSIONES

A continuación, se recogen las conclusiones más importantes obtenidas en este trabajo.

La regeneración de aguas residuales es un proceso factible, y ha quedado demostrado mediante el empleo de una planta piloto experimental que emplea tecnologías de membranas (ósmosis inversa) para dicho proceso.

El empleo de la cal, asociada a la acción del cloruro férrico, se muestra imprescindible para un buen funcionamiento de la decantación, ya que permite, no sólo procesos de desendurecimiento del agua, sino buenas características para la eliminación de sólidos en suspensión en los fangos del decantador.

Las membranas no han mostrado deterioro alguno, ni por ensuciamiento, ni por incrustaciones, en todas las fases del estudio, lo que permite asegurar, que en las condiciones evaluadas, el proceso tiene muy buenas perspectivas de futuro, con vistas a la reutilización a gran escala mediante las técnicas empleadas.

El empleo de los ensayos de *jar test* se ha mostrado como una buena herramienta de trabajo para la simulación de procesos de coagulación y floculación.

Las condiciones de optimización de la decantación son las siguientes:

- Cloruro férrico: 25 ppm.
- pH = 10.5.
- Floculante aniónico de peso molecular medio: 0.5 ppm.
- Hipoclorito sódico: 8 ppm.

REFERENCIAS

- (1) Mujeriego, R. (1994). "La reutilización planificada de efluentes". *Jornadas Internacionales sobre Aguas Residuales Urbanas e Industriales: Depuración, Gestión y Reutilización*. 13-15 de abril. Sevilla, España.
- (2) Asano T., Levine, A. (1995). "Wastewater reuse: a valuable link in water resources management" *Water Quality International*, 4, 20-24.
- (3) Ridgway, H., (1988). Microbial adhesion and Biofouling of Reverse Osmosis Membranes. In Parekh BS (ed) *Reverse Osmosis Technology: applications for high purity water production*. Marcel Dekker, Nueva York, Basel; 429-481.
- (4) Degremont, (1979). *Manual Técnico del Agua 4ª Ed.* Degremont. Bilbao, España.
- (5) Stanley E. Manahan (1993). *Fundamentals of Environmental Chemistry*. Ed. Lewis, Michigan E.E.U.U.●