

# Eliminación de sal y metanol del agua residual industrial por ósmosis inversa

J. Mora <sup>1,2</sup>  
P. Járay <sup>1</sup>  
G. Vatai <sup>1</sup>  
E. Bekassy-Molnar <sup>1</sup>

## Palabras clave

Membrana, ósmosis inversa, agua residual, sal, metanol, metales.

## Resumen

Este trabajo es la continuación del tratamiento de agua residual industrial con contenido de sal y metanol, que ya fue presentado anteriormente, por los procesos de nanofiltración y pervaporación. Los resultados de dicha investigación fueron publicados en la revista *Tecnología en Marcha*, volumen 15 N.º 3” (Mora y otros 2002). En esta otra parte de la investigación, presentaremos los resultados de experimentos utilizando la ósmosis inversa (OI). Los resultados típicos obtenidos en esta investigación fueron: Contenido de Sólidos Totales (CST) en

el agua original 0,82%, en el filtrado 0,098%, concentración de DQO (Demanda Química de Oxígeno) en el filtrado 97 mgO<sub>2</sub>/L. El contenido de metales en el filtrado, comparado con el del agua original, fue mucho más bajo. Se pudo observar que la OI rechazó los iones polivalentes (B, Ca, Cu, Mg, Mn, Fe, Sr, Zn) y también los monovalentes (Cu, K, Na). Los resultados de este trabajo muestran claramente que la membrana OI investigada redujo eficientemente la concentración de DQO del agua residual industrial, al tiempo que a mayor temperatura exhibe un mejor flujo del filtrado, mejor reducción del CST y mejor rechazo de los iones metálicos. El filtrado obtenido con baja concentración de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) puede ser reciclado y reutilizado en la misma tecnología.

- 
- 1 Szent Istvan University, Faculty of Food Science, Department of Food Engineering H-1118 Menesi str. 44. Budapest, Hungary, Tel: +36-1-372-62-32, Fax: +36-1-372-63-23. Correos electrónicos: (jmora@omega.kee.hu), (gvatai@omega.kee.hu), (bmolnar@omega.kee.hu).
  - 2 Dirección permanente: Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos, Escuela de Ciencias y Letras. Apartado: 223-4400 Ciudad Quesada-Costa Rica. Tel: (506)-475-5033, Fax: (506)-475-5395, Correo electrónico: (jesusmm@costarricense.cr)

## Introducción

La adecuación a las normativas comunitarias en materia de tratamiento de aguas residuales está induciendo a un remarcable incremento, tanto en lo que se refiere al número de procesos de control, como al grado de calidad de estos. En los tratamientos convencionales que han venido realizándose para la depuración de las aguas residuales, se consigue un cierto grado de depuración pero, a la salida de estos persisten todavía un serie de contaminantes, tales como sólidos en suspensión, compuestos orgánicos disueltos, nutrientes inorgánicos vegetales disueltos y minerales inorgánicos disueltos (Benedek y otros 1990). A fin de eliminarlos totalmente, se han desarrollado los denominados tratamientos terciarios de las aguas, tales como: sedimentación, absorción para eliminación de las sustancias orgánicas e inorgánicas, y ósmosis inversa (OI) para eliminación de sales (Moser 1999, Kiely 1999).

La OI es un proceso de membrana utilizado más comúnmente para el tratamiento del agua potable en Estados Unidos; no obstante, últimamente también lo están usando para el tratamiento de aguas residuales, como se describe en este trabajo. La OI es capaz de rechazar contaminantes o partículas, con diámetros tan pequeños como 0,0001  $\mu\text{m}$ . La OI puede describirse como un proceso de difusión controlada en que la transferencia de masa de iones a través de la membrana está controlada por difusión. Consecuentemente, este proceso puede llevar a la remoción de sales, durezas, patógenos, turbidez, desinfección de subproductos precursores (SPP), compuestos orgánicos sintéticos (COS), pesticidas y la mayoría de los contaminantes del agua residual conocidos hoy día (Mallevalle, 1998).

Ningún proceso presenta un tratamiento universal para todos los contaminantes (Taylor, 1995). La mayoría de los gases disueltos, como el sulfuro de hidrógeno

( $\text{H}_2\text{S}$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), alcoholes y algunos pesticidas pasan a través de la membrana de OI. Sin embargo, la tecnología de las membranas puede utilizarse para tratar un mayor número de contaminantes del agua potable y residual, más que ninguna otra tecnología de tratamiento (Mulder, 1998; Porter, 1990).

El objetivo básico de esta investigación es reducir la cantidad de sal y metanol en el agua residual por medio de la membrana OI para satisfacer la regulación de la legislación ambiental ( $\text{DQO} \leq 800 \text{ mg O}_2/\text{L}$ ) si el agua tratada se descarga a la planta de tratamiento biológico y ( $\leq 125 \text{ mg O}_2/\text{L}$ ) si se descarga al medio acuático receptor.

## Experimento

### Materiales y métodos

En el experimento se utilizó la membrana SW30HR de Ósmosis Inversa, fabricada por la compañía Dow Filmtec. Se trabajó con el equipo de laboratorio de la Universidad Szent Istvan University, Faculty of Food Science, Department of Food Engineering, Budapest-Hungary. El aparato de OI fue fabricado por la compañía HIDROFILT, el cual cuenta con una membrana plana de superficie activa de 720  $\text{cm}^2$ . El agua residual se obtuvo de la compañía perforadora MOL Rt Hungría, la cual contenía un 15 a 20 % de metanol y 0,55 a 0,82 % de contenido de sólidos totales. El contenido de alcohol de las muestras fue determinado por medio de la densidad relativa del alcohol con el instrumento Gibertini (con un error estándar de  $\pm 0,05\%$ ). La capacidad conductora fue determinada por medio del "Conductivity Méter", tipo OK-102/1. Los iones metálicos fueron determinados usando el ICP (Inductiv Coupled Plasma) en el Departamento de Química Aplicada de la misma Universidad.

*La adecuación a las normativas comunitarias en materia de tratamiento de aguas residuales está induciendo a un remarcable incremento, tanto en lo que se refiere al número de procesos de control, como al grado de calidad de estos.*

## Medición del flujo de agua residual

El experimento se llevó a cabo de la siguiente manera: se pusieron 8 litros de agua residual en el tanque de alimentación. Los parámetros de recirculación del flujo, presión se mantuvieron constantes: ( $Q = 300$  litros/hora,  $P = 50$  bar). Durante el experimento se trabajó con tres temperaturas diferentes (20, 30, 40 °C). La cantidad de filtrado recogido fue medido con probeta, el tiempo de recolección del filtrado con reloj *stopper* y su temperatura con termómetro de mercurio.

## Concentración del agua residual

La concentración del agua residual se llevó a cabo en las tres diferentes temperaturas mencionadas anteriormente. Durante la OI del agua residual, se recogieron cantidades de 1 litro de filtrado hasta que de los 8 litros quedaron 3 litros de concentrado en el tanque de alimentación. Se tomaron muestras del filtrado y del concentrado, para luego determinar la capacidad conductora. Asimismo del litro de filtrado se guardaron 200 mililitros para la determinación de los sólidos totales, el resto del filtrado se mezcló con los

*El experimento se llevó a cabo de la siguiente manera: se pusieron 8 litros de agua residual en el tanque de alimentación.*

otros para finalmente determinar el contenido de sólidos totales promedio, tanto del filtrado como del concentrado. Las muestras del filtrado y concentrado fueron destiladas para la determinación del alcohol y de los iones metálicos.

## Resultados y discusión

La figura 1 muestra el cambio de flujo del filtrado de agua residual *versus* tiempo a diferentes temperaturas. En las curvas podemos observar cómo el flujo del filtrado aumenta con el incremento de la temperatura; sin embargo, a medida que aumenta, el tiempo de concentración disminuye.

El fenómeno del aumento de flujo del filtrado a diferentes temperaturas se debe en parte a que con el aumento de la temperatura disminuye la viscosidad del agua y, por otra parte, a que los poros de la membrana se dilatan. La disminución del flujo *versus* tiempo se debe a que aumenta el contenido de sólidos totales (concentración de sal) en el concentrado y, por otra parte, los poros de la membrana se bloquean.

En la siguiente figura (2) podemos apreciar el cambio de flujo del filtrado de agua residual *versus* rendimiento. Aquí, podemos verificar lo ya expuesto en la figura 1; es decir, como aumenta el flujo del filtrado con el aumento de la temperatura. La figura 3 dibuja el cambio del rechazo medido de acuerdo con la capacidad conductora de la membrana *versus* rendimiento.

De las curvas podemos leer cómo con el aumento de la temperatura aumenta el rechazo de la membrana, lo cual se debe al cambio de difusión de la ósmosis inversa.

Por el efecto del incremento de la temperatura, aumenta significativamente el flujo del agua, mientras que el factor de

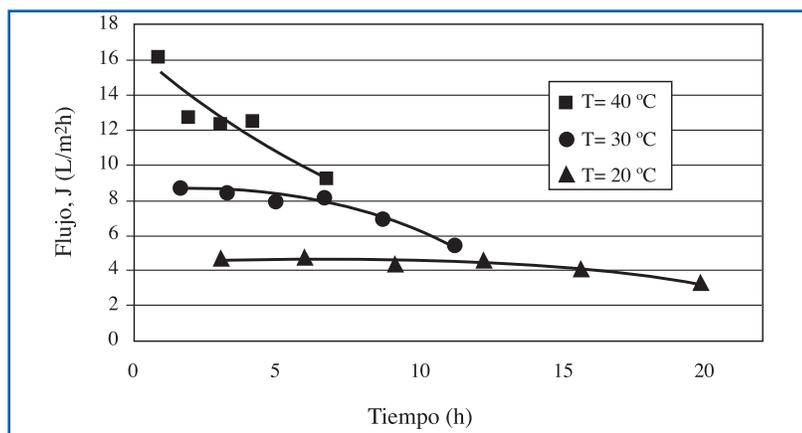
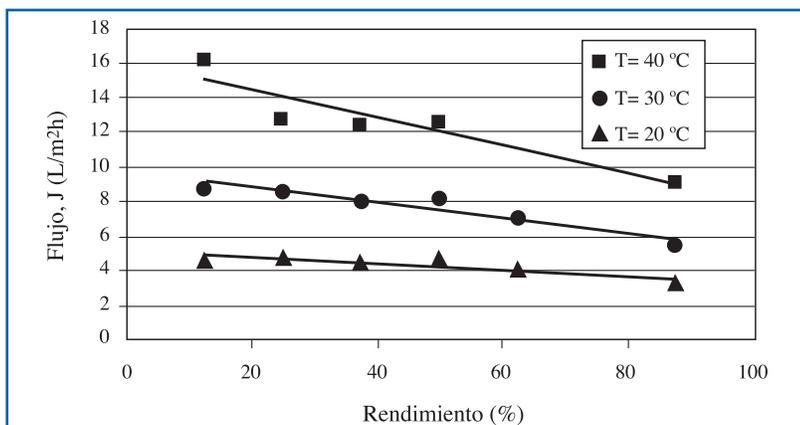


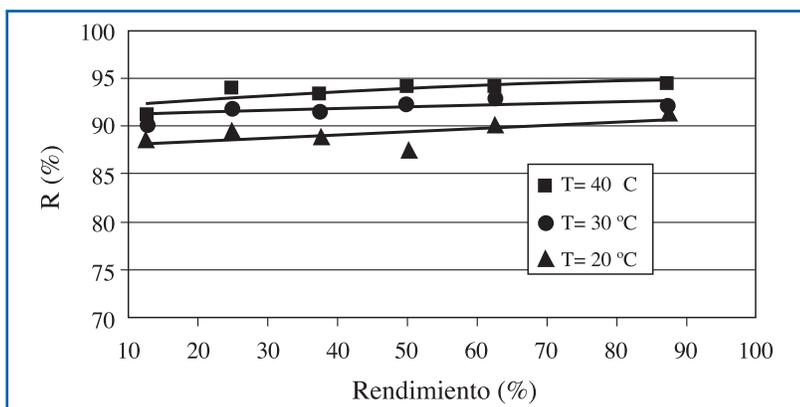
Figura 1

Cambio de flujo del filtrado de agua residual *versus* tiempo (Membrana SWA30HR,  $P=50$  bar).



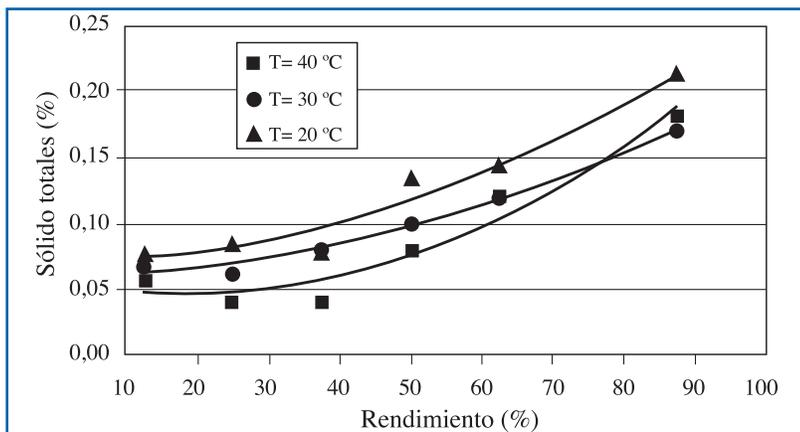
**Figura 2**

**Cambio de flujo del filtrado de agua residual versus rendimiento (Membrana SWA30HR, P=50 bar).**



**Figura 3**

**Cambio de rechazo del filtrado de agua residual versus rendimiento (Membrana SWA30HR, P=50 bar).**



**Figura 4**

**Cambio de los sólidos totales del filtrado de agua residual versus rendimiento (Membrana SWA30HR, P=50 bar).**

difusión de la sal disminuye, así pocas iones pasan a través de la membrana.

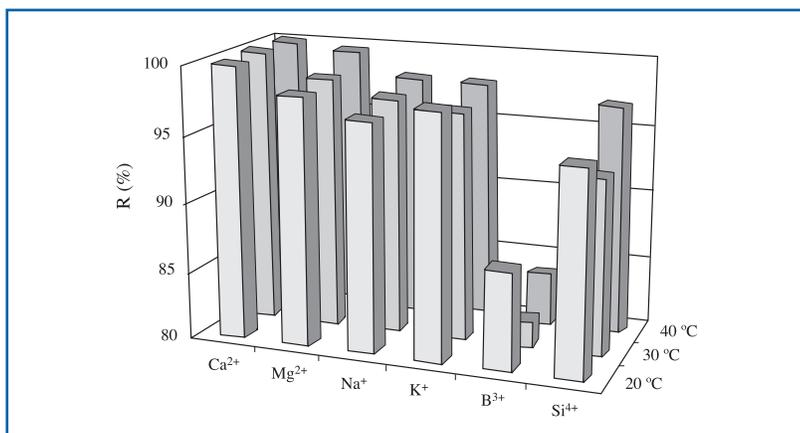
El cambio del contenido de sólidos totales del filtrado del agua residual *versus* rendimiento, aparece en la figura 4. Con el aumento de la temperatura disminuye el contenido de sólidos totales del filtrado, lo cual es beneficioso en el tratamiento de agua residual. Este fenómeno se puede explicar de la siguiente manera: al aumentar la temperatura aumenta la retención de sal de la membrana; así disminuye el contenido de sólidos totales en el filtrado.

En la figura 5 observamos la retención de cationes a diferentes temperaturas. Podemos establecer que el tipo de membrana SW30HR retiene los cationes en el siguiente orden:  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Si^{4+}$ ,  $B^{3+}$ .

De la figura anterior podemos notar que la membrana rechazó menos iones de  $B^{3+}$  (82-87 %); así, esta membrana no es recomendable para el tratamiento de aguas residuales con contenido de iones de  $B^{3+}$ . Los valores pertenecientes a la figura 5 aparecen en el cuadro 1.

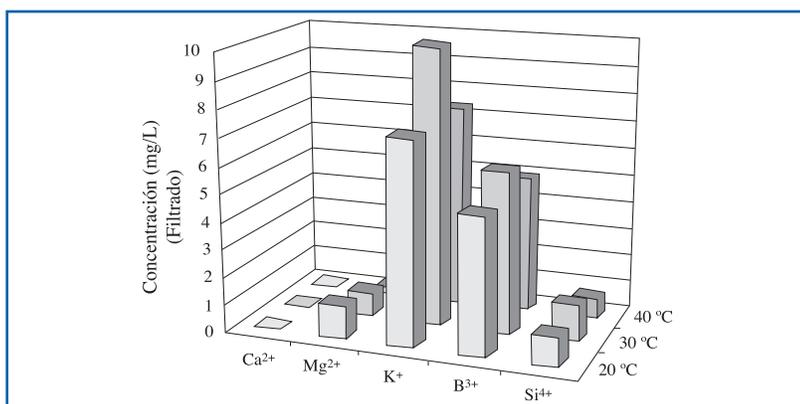
Durante el experimento (filtración del agua residual), los valores de la concentración de los cationes del filtrado promedio, disminuyeron comparado con los valores del agua inicial. En la figura 6 podemos observar el cambio de la concentración de los cationes del filtrado promedio donde la membrana rechazó mejor los cationes  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y el  $Si^{4+}$  que los cationes  $B^{3+}$  y  $K^+$ .

En la figura 7 podemos apreciar el cambio de la concentración de los cationes del concentrado, donde la membrana rechazó mejor los cationes  $Ca^{2+}$  y  $K^+$  que los cationes  $Mg^{2+}$ ,  $Si^{4+}$  y  $B^{3+}$ , por eso la membrana tipo SW30HR por su bajo rechazo de cationes, solo se recomienda para el tratado de aguas residuales con contenido de cationes



**Figura 5**

**Retención de los iones a diferentes temperaturas (Membrana SWA30HR, P=50 bar).**



**Figura 6**

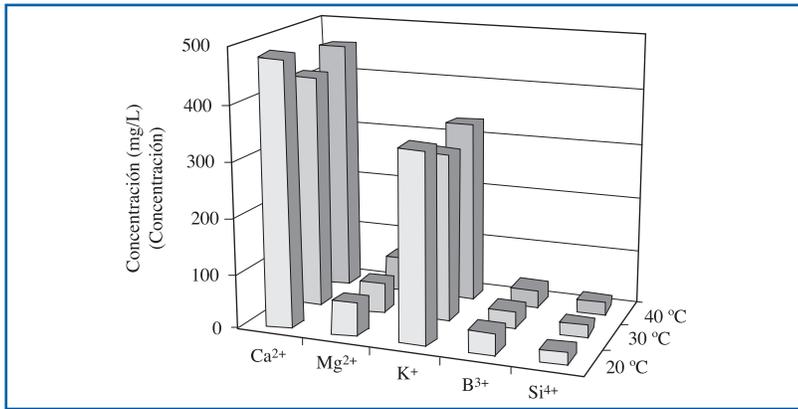
**Cambio de la concentración de cationes del filtrado promedio a diferentes temperaturas (Membrana SWA30HR, P=50 bar).**

Ca<sup>2+</sup> y K. Los valores de la concentración de cationes del filtrado promedio y del concentrado se presentan en el cuadro 2.

Debido a los altos valores de la concentración de los iones de Na<sup>+</sup> en la figura 8 se dibujó por separado, en la cual se muestran los cambios de la concentración de Na<sup>+</sup> obtenidos durante el experimento. En el concentrado aumentó cuatro veces, mientras que en el filtrado promedio doce veces disminuyó en comparación con la concentración de iones de Na<sup>+</sup> del agua residual original.

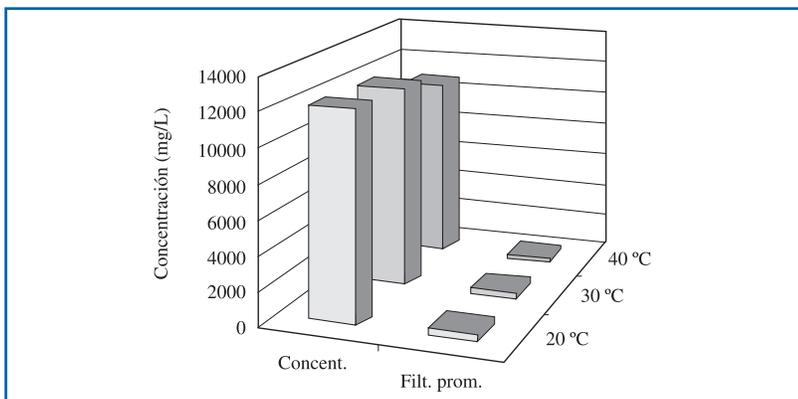
En la figura 9 mostramos el cambio de flujo del agua residual *versus* tiempo a diferentes presiones y a temperatura constante (40 °C). De la figura podemos apreciar que al aumentar la presión aumenta el flujo. Pareciera que entre 50 y 60 bar de presión el flujo se redujo a los valores iniciales. El cambio se debe que a los 60 bares el agua se ha concentrado bastante, además con la formación de la torta, junto con el bloqueo de los poros y el ensuciamiento adsorptivo, puede dar como resultado una resistencia al flujo de permeado que eventualmente excede a la resistencia de la membrana, la torta o capa de gel depositada sobre

Cationes	Rechazo de cationes (%)		
	T = 20 °C	T = 30 °C	T = 40 °C
Ca <sup>2+</sup>	99,99	99,99	99,99
Mg <sup>2+</sup>	98,08	98,36	99,59
Na <sup>+</sup>	96,73	97,29	97,87
K <sup>+</sup>	97,84	96,62	97,77
B <sup>3+</sup>	87,12	81,94	84,04
Si <sup>4+</sup>	94,80	92,83	96,80



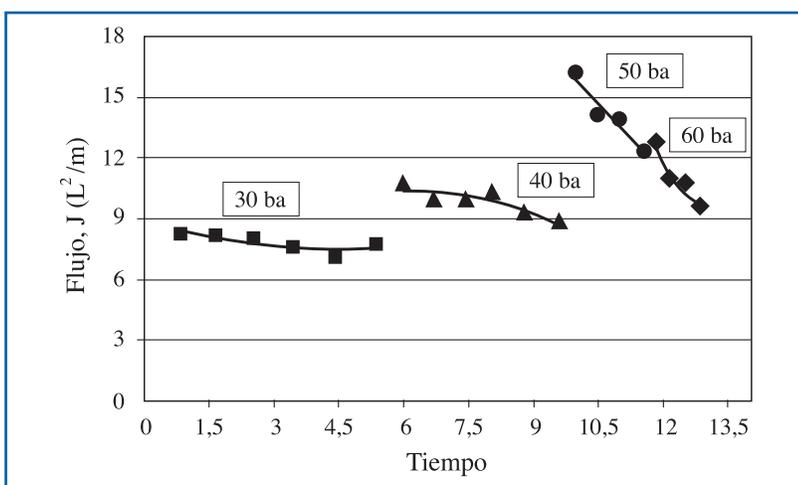
**Figura 7**

**Cambio de la concentración de los cationes del concentrado a diferentes temperaturas (Membrana SWA30HR, P=50 bar).**



**Figura 8**

**Concentración de Na<sup>+</sup> en el filtrado promedio y el concentrado a diferentes temperaturas (Membrana SWA30HR, P=50 bar).**



**Figura 9**

**Cambio de flujo del filtrado de agua residual versus tiempo a diferentes presiones (Membrana SWA30HR, T=40°C).**

la membrana actúa esencialmente como una segunda membrana, a través de la cual debe pasar el agua permeada. Esto se observa a menudo en la práctica, cuando las aguas brutas se aplican a las membranas con poco pretratamiento. Con el paso del tiempo, a cada valor de presión pertenecen los valores de flujo, los cuales muestran una tendencia de disminución, debido a la torta que se forma en la superficie de la membrana.

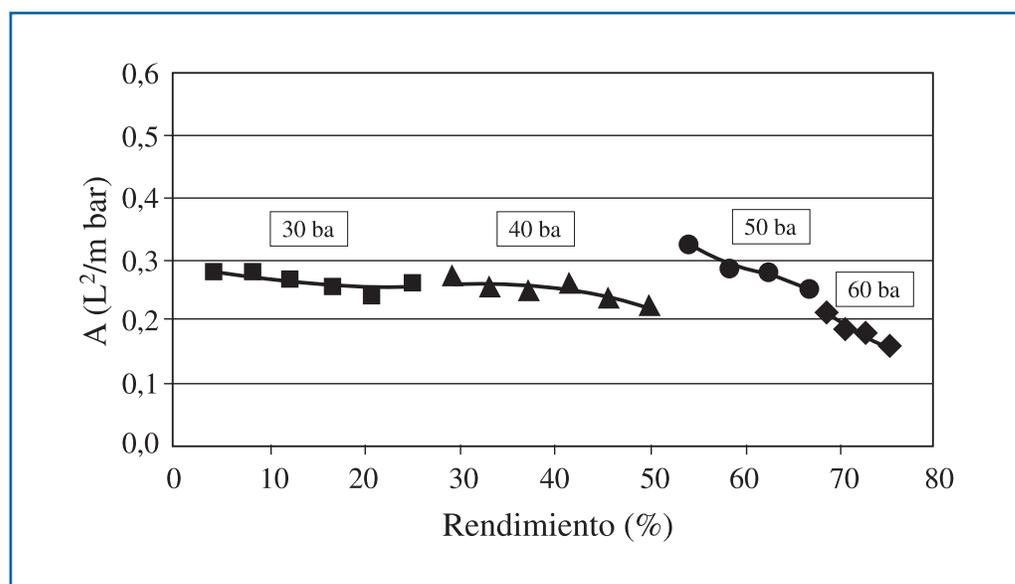
Con base en los flujos medidos durante el experimento, se calcularon los valores de permeabilidad que se muestra en la figura 10. La permeabilidad hace que los valores de flujo sean independientes de la presión, por eso a los puntos obtenidos se puede dibujar una línea vertical. En este caso, podemos trazar dicha línea en los puntos de hasta casi un 50% del rendimiento; sin embargo, de aquí en adelante cambia. Los puntos muestran una tendencia a disminuir, lo cual se debe a la formación de la torta y a las capas de gel.

Durante el experimento, los valores de DQO se redujeron significativamente (Cuadro 3). La temperatura prácticamente no influyó sobre la DQO. En el filtrado promedio disminuyó un 99%, mientras que en el concentrado aumentó cuatro veces en comparación al del agua original. Esto lo explica la propiedad característica de la membrana, ya que la membrana tipo SW30HR rechaza los iones de Na<sup>+</sup> entre un 95 y 99%.

Desde el punto de vista de los valores de la DQO y basándonos en los resultados obtenidos, podemos deducir que la membrana SW30HR es adecuada para el tratamiento de esta agua residual. No obstante, es importante tomar en cuenta también la eliminación del componente metanol. La membrana estudiada en este experimento no es apta para la eliminación del metanol del agua residual; en el cuadro 4 podemos observar los

**Cuadro 2**  
Valores de la concentración de cationes del filtrado promedio y del concentrado

Cationes	Concentración de cationes (mg/L)					
	T = 20 °C		T = 30 °C		T = 40 °C	
	Filt. promed.	Concentr.	Filt. promed.	Concentr.	Filt. promed.	Concentr.
Ca <sup>2+</sup>	0,043	478,34	0,043	423,59	0,043	458,4
Mg <sup>2+</sup>	1,21	63,18	0,87	52,94	0,26	63,75
K <sup>+</sup>	7,37	340,56	10,26	303,55	7,37	330,9
B <sup>3+</sup>	4,96	38,51	5,84	32,34	5,005	31,35
Si <sup>4+</sup>	1,07	20,58	1,36	18,96	0,71	22,18



**Figura 10**

Cambio de la permeabilidad de agua residual *versus* rendimiento a diferentes presiones (Membrana SWA30HR, T=40°C).

**Cuadro 3**  
Valores de la DQO del agua inicial, filtrado promedio y el concentrado a diferentes temperaturas

Muestra	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)		
	T = 20 °C	T = 30 °C	T = 40 °C
Filtrado promedio	122	119	119
Concentrado	37900	39300	39300
Agua original		9470	

**Cuadro 4**  
**Valores del contenido de metanol del agua original, filtrado promedio y el concentrado a diferentes temperaturas**

Muestra	Contenido de metanol (%)		
	T = 20 °C	T = 30 °C	T = 40 °C
Filtrado promedio	37,05	37,30	37,68
Concentrado	36,19	38,20	33,08
Agua original		39,37	

*Para la eliminación del metanol se recomienda combinar el proceso OI con otra técnica de membrana ya sea la pervaporación o la destilación por membrana.*

valores obtenidos. De acuerdo con los valores obtenidos, es claro que las moléculas del metanol pudieron atravesar los poros de la membrana, ya que la membrana retiene principalmente los iones. Para la eliminación del metanol se recomienda combinar el proceso OI con otra técnica de membrana como la pervaporación, la cual ya fue aplicada al tratamiento de este mismo tipo de agua residual (Mora y otros 2002) o la destilación por membrana.

### Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en la investigación del agua residual con contenido de sal y metanol, establecemos que la membrana tipo SW30HR es adecuada para la eliminación de la sal; sin embargo, el metanol no lo elimina. Para la eliminación del metanol se recomienda combinar el proceso OI con otra técnica de membrana ya sea la pervaporación o la destilación por membrana. La membrana fue capaz de separar los contaminantes del agua (iones), ya que redujo satisfactoriamente los valores de la DQO a los niveles establecidos por la legislación ambiental. Se recomienda realizar el tratamiento a 50 bar de presión y 40 °C de temperatura, ya que en estos parámetros se obtuvo un mejor rendimiento; no obstante, desde el punto de vista económico, hay que examinar los costos. Utilizando estos

tipos de tratamiento el agua tratada, se puede descargar directamente al medio acuático receptor, a la planta de tratamiento biológico o reutilizarse en la tecnología perforadora.

### Agradecimientos

Los autores desean agradecer las grandes contribuciones del ITCR (Instituto Tecnológico de Costa Rica), MICIT (Ministerio de Ciencia y Tecnología), CONICIT (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas) y de la Fundación OTKA, número T 037848.

### Referencias bibliográficas

- Benedek P., Valló S., "Vízisztítási-szennyvíztisztítási zsebkönyv". A környezet-védelmi és vízgazdálkodási minisztérium megbízásából kiadja a m\_szaki könyvkiadó, Budapest, 275-278, 1990.
- Kiely G. "Ingeniería Ambiental". McGraw-Hill/Interamericana de España, 1999.
- Mallevalle J. et al. "Water Treatment membrane Processes", American Water Works Association Research Foundation Publications, 1998.
- Mora Molina J., Vatai Gy., Békássyné-Molnár E. "Aplicación de la Nanofiltración y Pervaporación en el tratamiento de aguas residuales", Tecnología en Marcha, N° 15-3: 3-9, 2002.
- Moser M. and Pálmai Gy. "The basic of environmental protection" (in

Hungarian), Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 233-293, 1999.

Mulder M. "Basic Principles of membrane Technology", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 1997.

Porter M. C. "Handbook of Industrial Membrane Technology", Noyes Pu-

blications, United States of America, 1990.

Taylor, J. S. *et al.* "Drinking Water Regulations and membrane Application", International Desalination and Water Reuse Journal, 4/4, Feb-March, 1995.