

# RECUPERACIÓN DE AGUA DE EFLUENTES DE UNA INDUSTRIA DE CEREALES UTILIZANDO MEMBRANAS

• Jesús Escobar-Jiménez • Claudia Muro-Urista •  
*Instituto Tecnológico de Toluca, México*

• Mario Esparza-Soto •  
*Centro Interamericano de Recursos del Agua, México*

• Rosa María Gómez-Espinoza •  
*Universidad Autónoma del Estado de México*

• Carmen Díaz-Nava • Beatriz García-Gaitán • Rosa Elena Ortega-Aguilar •  
• Rosa Elvira Zavala-Arce •  
*Instituto Tecnológico de Toluca, México*

## Resumen

Para recuperar agua de reúso en actividades industriales, se evaluó el proceso de filtración tangencial con membranas de efluentes previamente tratados por métodos biológicos en la planta experimental del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA). Entre las características del efluente destacan una alta turbiedad, la presencia de dos colorantes sintéticos de uso alimenticio, azul brillante y tartrazina, que son causantes de varias cortinas de coloración verde, además del contenido de sales y materia orgánica con valores de DQO aún altos para considerar el reúso del agua. En la evaluación del proceso de filtración fueron probadas dos membranas cerámicas con umbral de corte de 150 y 15 kDa, y dos poliméricas de fibra hueca con 50 y 13 kDa, integradas individualmente a un equipo de filtración a escala piloto. En cada proceso se determinó el efecto de la presión transmembrana, la velocidad de flujo de agua y las características de la membrana sobre los caudales de agua filtrada y la calidad obtenida. Los resultados mostraron que las membranas de 15 y 13 kDa fueron las más eficientes en el tratamiento del efluente del CIRA para obtener parámetros de calidad en el agua requeridos para actividades industriales de limpieza de equipos y suministro de agua a calderas. Sin embargo, el flujo de agua recuperada del efluente fue mayor en la membrana de 13 kDa, alcanzando  $35 \text{ Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$  de flujo de agua permeada durante 120 minutos. Mientras que la membrana más estable fue la de 15 kDa, recuperando  $28 \text{ Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$  de agua durante 190 minutos, sin problemas de polarización.

**Palabras clave:** recuperación de agua, industria de cereales, membranas, colorantes.

## Introducción

Los procesos de filtración tangencial con membranas son considerados procesos limpios de separación-concentración, utilizados frecuentemente para purificar, concentrar y separar partículas finas contenidas en disoluciones. Su aplicación en la industria de proceso es

variada; sin embargo, para el tratamiento de aguas son utilizados como métodos avanzados de depuración de efluentes industriales para obtener agua fresca con posibilidades de reúso (De Florio *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2005; Allegre *et al.*, 2006; Benítez *et al.*, 2009). La regeneración de agua de uso industrial se debe a la capacidad de las membranas para separar partículas disueltas

difíciles de remover por otros tratamientos. Además de obtener agua de alta calidad, los procesos de membrana se pueden aplicar en el tratamiento de efluentes para concentrar los contaminantes del agua, recuperando residuos que son de gran valor para la empresa de origen (pigmentos, metales y polímeros, entre otros) (Allegre *et al.*, 2006; Benítez *et al.*, 2009). La recuperación de agua y partículas que contiene el efluente reditúan un valor agregado al tratamiento con membranas. El beneficio económico se debe principalmente a la alternativa del reúso del agua para disminuir el consumo de agua potable en actividades industriales (Ramírez-Acosta y Mendoza-Espinoza, 2004).

Membranas individuales o en arreglos secuenciales en serie o paralelo son utilizadas en la producción de agua para uso en torres de enfriamiento, limpieza en general, transportación de equipo, procesos de manufactura e impresión de tableros. La calidad del agua que se obtiene en el proceso de filtración depende del efluente, de las características de las membranas (tamaño de poro, material y selectividad), así como de las condiciones de operación utilizadas en el tratamiento (Arreguín y Martín, 2000). El uso de las membranas de microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) pueden constituir la primera o única etapa de tratamiento para recuperar agua limpia; debido a su tamaño de poro, estas membranas se utilizan para separar partículas con tamaños entre 0.01-20  $\mu$ ; mientras que las membranas de ósmosis inversa (OI) y nanofiltración (NF) se aplican para eliminar iones de metal, sales, ácidos húmicos y, en general, partículas del orden de 0.001  $\mu$ m (Ibañez, 2006). La eficiencia de estos procesos se mide en términos de la calidad del agua obtenida y de la capacidad de la membrana para permear el agua por unidad de área.

El fácil escalamiento y la alta capacidad de remoción son ventajas que ofrecen los procesos de membrana sobre otros tratamientos. Debido al bajo consumo de energía que requieren para

llevar a cabo la separación, se identifican como procesos limpios (Cabassud *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2005; De Florio *et al.*, 2005).

Bajo el esquema anterior, en este escrito se presenta la evaluación de los procesos de membrana de UF para el tratamiento de aguas residuales originadas en una industria de cereales localizada en el Estado de México. El efluente es previamente tratado en la planta del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), ubicada también en el Estado de México. El objetivo del trabajo fue estudiar el comportamiento de cuatro membranas para recuperar agua con características de calidad que definieran su uso en actividades industriales. La evaluación se basa en determinar las condiciones de operación adecuadas para la remoción de distintos contaminantes contenidos en el efluente, la estabilidad de la membrana y la obtención de mayores flujos de agua durante la filtración o permeado.

Como antecedente a la aplicación del proceso de membranas se partió de las condiciones presentadas en el efluente del CIRA. La mayoría de los contaminantes, excepto los colorantes y las sales, fueron reducidos a través del tratamiento biológico que se lleva a cabo en esta planta. Sin embargo, la calidad del agua tratada refleja aún concentraciones altas de DQO y conductividad; además de diferentes cortinas de coloración verde que se forman como producto de la mezcla de los colorantes azul brillante y tartrazina, los cuales permanecen aún después del tratamiento en la planta. Estos productos se identificaron previamente como colorantes de uso alimenticio, altamente solubles y de moléculas químicamente complejas (Muro *et al.*, 2009).

Para reutilizar el agua tratada en actividades industriales se demanda principalmente la eliminación del color, la disminución de la conductividad y la remoción de la materia orgánica residual contenida en el efluente.

Métodos como la floculación y coagulación se han implementado con éxito para eliminar los colorantes insolubles (Allen y Koumanova,

2005; Forgacs *et al.*, 2004; Seval *et al.*, 2006); sin embargo, los colorantes de uso alimenticio son generalmente sintéticos y solubles en agua, lo que dificulta su separación por estos métodos. Otras alternativas para la remoción de colorantes, como la fotocatalisis heterogénea y homogénea, los procesos catalíticos, y el uso de materiales sintéticos y naturales como adsorbentes, se reportan en diversas investigaciones (Guoting *et al.*, 2006; Calvo *et al.*, 2007; Faria *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2006; Ofomaja y Ho, 2006). Sin embargo, generalmente son procesos exclusivos de un solo contaminante. Por su parte, Mutlua *et al.* (2002), Koyuncu (2003), y Benítez *et al.* (2006), reportaron entre un 85 y 92% en la remoción de colorantes y residuos con membranas de MF y UF, al tratar efluentes de una industria alimenticia, en combinación con procesos biológicos, asegurando su reúso en distintas aplicaciones. También desde años anteriores, en un sector industrial del norte de Taiwán se encuentran operando procesos con membranas para obtener agua potable a partir de sus efluentes (Chen *et al.*, 2005) y en algunos lugares de Estados Unidos de América se reporta la producción de agua con calidad equiparable o superior al agua potable, a partir del tratamiento terciario de aguas residuales (Ramírez-Acosta y Mendoza-Espinoza, 2004). La acertada selección de la membrana y la determinación de sus características de operación han proporcionado información para conseguir separaciones exitosas de los componentes que se desean remover. El problema se presenta cuando las características de la membrana no satisfacen los requerimientos en la filtración. El alto contenido de diferentes contaminantes en el efluente y el uso inadecuado de condiciones de operación causan saturación temprana en las membranas por acumulación de partículas que llegan a obstruir sus poros, lo que afecta drásticamente el volumen de agua filtrada y la calidad, además de limitar la productividad del proceso, elevar el costo en la recuperación de los productos que se pueden separar y afectar la vida útil de la membrana (Muro *et*

*al.*, 2009). En este sentido, se han desarrollado diferentes trabajos para determinar y controlar las condiciones favorables de operación de las membranas en el tratamiento de efluentes (Marcucci *et al.*, 2001, 2002; Ribeira *et al.*, 2002; Gupta *et al.*, 2004; Lopes *et al.*, 2005; Cheima *et al.*, 2005; Suen *et al.*, 2007; Muro *et al.*, 2009). Especialmente en Cabassud *et al.* (2001), se realizaron experimentos en un nivel piloto para optimizar matemáticamente la velocidad de flujo tangencial y la presión transmembrana en la decoloración de efluentes previamente tratados. Los resultados encontrados hicieron posible implementar los procesos de membranas en varias plantas de producción de agua potable a partir de efluentes industriales, que a la fecha continúan operando a pesar de la variabilidad en las características de las aguas residuales.

## Materiales y métodos

### Material

El muestreo se realizó en la laguna estabilizadora de la planta del CIRA, recolectando un lote de 5 l de efluente por cada muestreo, de los cuales 3.5 l fueron destinados para alimentar un módulo de filtración de membranas a nivel piloto. El método utilizado para el muestreo es el descrito en la norma (NMX-AA-003). La frecuencia del muestreo fue tres veces al día y dos veces por semana, durante seis meses.

### Características del efluente del CIRA

De cada lote de muestra se destinaron 1.5 l para determinar los parámetros de calidad del efluente, obteniendo 15 muestras de 100 ml, de las cuales se seleccionaron al azar tres muestras para los respectivos análisis. Entre las características que son visibles en efluente destacan la turbiedad y la inherente coloración azul-verde producida por los colorantes sintéticos azul brillante y la tartrazina, previamente identificados como los principales cromóforos causantes de la tonalidad de varias

cortinas de verde, sobresaliendo aún de la coloración que producen las algas de la laguna estabilizadora de la planta de tratamiento. Mediante información dada en Muro *et al.* (2009) sobre los colorantes, se midieron las absorbancias del azul brillante o azul 1 a una longitud de 630 nm y de la tartrazina a 426 nm en un espectrofotómetro Lambda 25 UV/Vis Perkin Elmer. A través de curvas de calibración se determinaron las concentraciones de estos colorantes en las muestras seleccionadas.

Otros parámetros y métodos utilizados en la caracterización del efluente fueron los siguientes: sólidos totales mediante el método gravimétrico indicado en la norma NMX-AA-034, pH y conductividad en un potenciómetro Cocuctronic PC18; turbiedad en un microturbidímetro HFSscientific; DQO en un equipo HACH DR 2000. Los métodos analíticos mencionados están estandarizados y también pueden ser consultados en Standard Methods (APHA, 2005).

#### *Equipo experimental de filtración tangencial con membranas*

El equipo utilizado en la filtración tangencial fue diseñado e integrado para operar en forma automatizada utilizando un sistema electrónico de control (PLC) de la presión y flujos de alimentación en el proceso. En la figura 1 se muestra el equipo de membranas a escala piloto que fue utilizado en el proceso de filtración y en la figura 2 se tiene el diagrama de flujo correspondiente. Básicamente el equipo se compone de un tanque de alimentación (1) y un depósito en que se recibe el agua proveniente de la membrana (10); una bomba peristáltica (2) no comercial con variación de velocidad de 10 a 80 rpm para el suministro del efluente a la membrana de trabajo (3). Además, el equipo cuenta con instrumentos de medición (6 y 7), un sistema de control y de válvulas (4, 5) para regular los flujos. La presión de entrada al sistema la proporciona el caudal del efluente que ingresa a la membrana, el cual está dado por la potencia de la bomba.

A través de las válvulas se varía el caudal del permeado, aumentando la resistencia para generar una presión transmembrana (*PTM*). De las condiciones en que se opera la membrana y su naturaleza, depende el caudal de agua permeada (9) y la corriente de recirculación (8). El sistema de control de la (*PTM*), del tiempo de operación (*t*) y de las válvulas, se encuentra integrado en un PLC en el equipo de filtración.



Figura 1. Equipo de filtración de membranas, escala piloto.

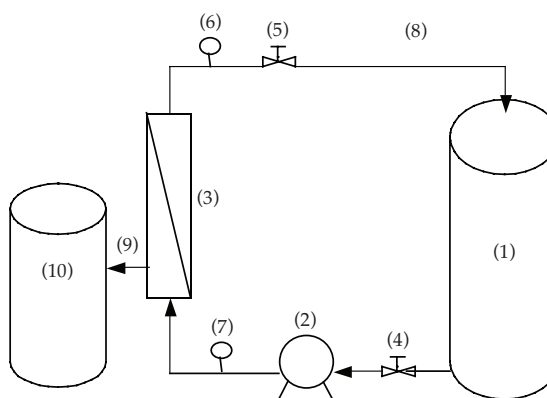


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de filtración con membranas.

El proceso fue diseñado para operar en forma continua durante un tiempo previamente establecido o durante el cual la (*PTM*) presenta variaciones de  $\pm 0.2$  bar. El paro del proceso indica la polarización de la membrana en uso por aumento de la (*PTM*) fuera del rango establecido; mientras que el arranque está programado una vez que finaliza el lavado de la membrana.

Las membranas utilizadas en la investigación fueron seleccionadas de acuerdo con las características del efluente del CIRA, probándose cuatro membranas cuyo umbral de corte corresponde al rango de la UF. Dos de las membranas son de material cerámico con umbral de corte de 150 y 15 KDa; longitud de 0.545 m y área de filtración de 0.35 m<sup>2</sup>. Las otras dos membranas son poliméricas de 50 y 13 KDa; longitud de 0.552 m y área de 0.6 m<sup>2</sup>. Cada membrana viene integrada a un módulo tubular y éste, a su vez, se integra al equipo de filtración alternadamente y de forma individual.

#### *Determinación de las características operativas de las membranas*

Mediante la caracterización operativa de las membranas de prueba se determinaron las condiciones de filtración de cada una, referidas al efecto de la variación de la (*PTM*) y la velocidad de flujo tangencial (*v*) sobre los flujos de permeación de las membranas. Además, se consideró la determinación del punto de carga cero (*pcz*), característico del material de la capa superficial de las membranas, la cual tiene el contacto con el fluido cuando se encuentra funcionando. La determinación se hizo para identificar las propiedades anfóteras de las membranas y su efecto sobre los problemas de polarización, que impiden el paso libre del agua por este comportamiento. Las pruebas se hicieron con agua destilada y a temperatura ambiente, determinando la capacidad de filtración en condiciones ideales de calidad del fluido. Por tanto, el flujo de agua filtrada ( $J_{\text{agua}}$ ) fue referido al flujo de agua proveniente

de la membrana por filtración de agua libre de carga de partículas.

#### *Determinación del flujo de permeado en las membranas*

La variación de la velocidad de la bomba proporcionó diferentes caudales ( $Q_f$ ) en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> de alimentación al módulo de las membranas. A través de dichos caudales y el área transversal ( $A_t$ ) en m<sup>2</sup> de las membranas, fue determinada la velocidad de flujo tangencial (*v*) en ms<sup>-1</sup> mediante la ecuación (1):

$$v = \frac{Q_f}{A_t} \quad (1)$$

Posteriormente, para llevar a cabo el estudio de la influencia de la (*PTM*) sobre el caudal de agua ( $Q_{\text{agua}}$ ) filtrada, se seleccionaron las velocidades de 1.5, 2.5 y 3 ms<sup>-1</sup>, y el intervalo de (*PTM*) de 2-5 bar. En estas pruebas se encontraron las condiciones de (*v*) y (*PTM*) en las que se obtiene la máxima densidad de flujo del agua ( $J_{\text{agua}}$ ) por cada membrana. Esta información fue útil para conocer la capacidad de permeación de las membranas y el uso de las condiciones de operación adecuadas al proceso.

El tratamiento se realizó en forma continua por recirculación del flujo rechazado hacia el depósito de la alimentación. Durante el proceso se midió el caudal de agua permeada ( $Q_{\text{agua}}$ ) con un rotámetro y a partir de este valor se determinó la densidad de permeado ( $J_{\text{agua}}$ ) en Lh<sup>-1</sup>m<sup>2</sup>, en función del área (*A*) de la membrana en m<sup>2</sup>, utilizando la ecuación (2):

$$J_{\text{agua}} = \frac{Q_{\text{agua}}}{A} \quad (2)$$

La presión (*PTM*) se determinó a través del promedio de la presión de entrada ( $P_e$ ) y salida ( $P_s$ ) al módulo de membrana, mediante la ecuación (3):



$$PTM = \frac{P_e + P_s}{2} \quad (3)$$

#### Determinación del punto de carga cero de las membranas

Se determinó el (*pcz*) o carga cero de la superficie de las membranas para establecer el pH favorable en la filtración, con el fin de obtener los mayores flujos de permeación y evitar posibles interacciones de la membrana con las partículas contenidas en el efluente. Para la determinación del (*pcz*) se siguió el método Mullet *et al.* (1999), utilizando soluciones de agua destilada con HCl o NaOH para modificar el pH del agua de alimentación ( $pH_f$ ) de 5, 6, 7, 8 y 9. En cada caso se registró el pH en los flujos de permeado ( $pH_p$ ) cada diez minutos, hasta alcanzar un valor constante por cada solución alimentada durante cincuenta minutos de filtración.

Posteriormente se estableció gráficamente la función  $pH = (pH_f - pH_p)$  con los valores de ( $pH_f$ ), obteniendo una curva que se prolongó hasta su corte con el eje de las abscisas (punto cero). En el punto de corte de ( $pH_p$ ) fue localizado el (*pcz*) de las membranas. Debido a que el (*pcz*) es función del material de las mismas, sólo se consideró una membrana cerámica y otra polimérica en esta prueba. El experimento se realizó a 22 °C y bajo las condiciones favorables de (*PTM*) y (*v*) del proceso, determinadas en los puntos anteriores.

#### Evaluación del proceso de membranas en la recuperación del agua

Se evaluó la eficiencia de cada membrana en el tratamiento del efluente del CIRA a través de la calidad del agua permeada y el flujo de permeación obtenido en el intervalo de operación de (*v*) y (*PTM*). Además, se determinó la estabilidad de las membranas para filtrar caudales de agua en forma continua en un tiempo determinado sin problemas saturación.

#### Determinación de la calidad del agua recuperada por las membranas

Utilizando muestras de permeado obtenido por cada membrana, se determinaron los parámetros de calidad del agua recuperada. Las muestras se recolectaron cada treinta minutos durante noventa minutos de operación, considerando una repetición por cada muestra, para un volumen de 3.5 l de efluente. Los experimentos se llevaron a cabo variando los intervalos de operación de (*PTM*) y (*v*), previamente establecidos.

Para determinar la calidad del agua producida por las membranas, se consideraron los mismos parámetros y métodos utilizados en la caracterización del efluente del CIRA, incluyendo la determinación de los iones  $Ca^{2+}$ ,  $K^{1+}$ ,  $Na^{1+}$  y  $Fe^{+3}$ . Los iones  $Ca^{2+}$ ,  $K^{1+}$ ,  $Na^{1+}$  fueron determinados por el método de análisis a la flama en un equipo Digital Flame Analyzer Modelo 2655 Cole-Portmer-Instrument Company; el ión  $Fe^{3+}$ , mediante el método espectrofotométrico que marca la norma NMX-AA-051-SCFI-2001, en un equipo de absorción atómica Shimadzu AA-6200. Para llevar a cabo el análisis de estos iones, se recolectaron cuatro muestras de 160 ml de permeado cada treinta minutos, considerando una réplica por cada análisis y de cada membrana durante noventa minutos de filtración. Las muestras fueron preservadas utilizando ácido nítrico al 1% en peso hasta obtener un pH 2. Después de 48 horas, se inyectó una muestra preservada de 50 ml en la columna correspondiente del equipo para identificar los iones mencionados. Una vez que fueron identificados, se construyeron curvas de calibración entre las unidades de emisión de flama y las diferentes concentraciones en solución acuosa de los iones  $Ca^{2+}$ ,  $K^{1+}$ ,  $Na^{1+}$ , obteniendo curvas confiables con una  $R^2$  cercana a 1.0 de correlación entre los datos obtenidos. Conocida esta relación, se determinaron las unidades de emisión de estos iones en muestras de agua permeada y se determina-

ron las concentraciones correspondientes a esos valores. Para la determinación del ión  $\text{Fe}^{3+}$  también se construyó una curva de calibración de la energía absorbida por el átomo para las diferentes concentraciones del ión  $\text{Fe}^{3+}$  obtenida de su preparación en solución acuosa. La correlación de  $R^2$  de los datos de la curva de calibración fue cercana a 1, con lo cual se confirmó la confiabilidad de las determinaciones de la concentración de este ión en los permeados, utilizando el valor de la absorción de energía reportada por el equipo. El promedio de cada determinación es presentado en los resultados correspondientes.

#### *Determinación del caudal de flujo de agua recuperada en la filtración del efluente*

El caudal del agua recuperada por las membranas ( $Q_p$ ) en la filtración del efluente fue medido mediante un rotámetro durante noventa minutos de operación. La medición se hizo en las diferentes condiciones de (PTM), considerando el valor de ( $v$ ) con las que fueron operadas las membranas. El flujo de agua recuperada fue expresado en términos de la densidad del permeado ( $J_p$ ), utilizando la ecuación (2), bajo condiciones de presión y velocidad de flujo en el sistema de filtración.

Por otro lado, también se analizó la estabilidad de las membranas con respecto al periodo en el que el flujo de permeado ( $J_p$ ) permaneció constante durante la filtración del efluente bajo condiciones de operación previamente determinadas. La disminución severa de ( $J_p$ ) y el aumento de la (PTM) en el proceso fue indicativo de la saturación o polarización en la membrana, proporcionando el tiempo favorable de operación de la filtración y el tiempo en que el proceso debe detenerse para limpiar la membrana. Con estos datos fue posible programar en el PLC el paro y arranque del equipo en los tiempos encontrados, así como el mantenimiento de las membranas.

## Resultados y discusión

### *Características del efluente del CIRA*

No obstante de que el proceso biológico fue eficiente para disminuir la DQO de  $1\ 500\ \text{mg l}^{-1}$  con la que ingresó el agua residual a la planta del CIRA, después del tratamiento aún se encontraron valores altos de este parámetro en cantidades promedio de  $487\ \text{mg l}^{-1}$ , conservando también valores altos en la conductividad con  $1\ 715\ \mu\text{Scm}^{-1}$ , turbiedad de 102 UNT,  $1.04\ \text{g l}^{-1}$  de sólidos totales y alrededor de 7-8 unidades de pH, presumiblemente debido a la presencia de colorantes y otros residuos por aditivos usados en la industria de cereales. Específicamente, el valor de la conductividad mostró que sales de sodio, potasio, hierro y calcio provenientes de conservadores y nutrientes elevaron este valor, además de contribuir al aumento de la DQO del efluente.

Por otro lado, también se hace notar la concentración de los colorantes, encontrándose promedios de 9 y  $4.08\ \text{mg l}^{-1}$  de tartrazina y azul 1, respectivamente. Aunque la concentración del azul 1 es menor, la intensidad de coloración que causa en el efluente es suficiente para producir una mezcla con la tartrazina. De acuerdo con la Food and Drug Administration (FDA, 2008), el azul brillante, también conocido como azul 1, y la tartrazina, están identificados comercialmente como E-133 y E-102, respectivamente. En la figura 3 se presenta la estructura química de estos colorantes, lo cual explica su permanencia en el efluente aun después de haber sido tratado por métodos biológicos. Con respecto a la tartrazina, la presencia de un grupo azo identifica a este colorante como un compuesto de alta resistencia al ataque microbiano, por lo que son necesarios microorganismos especiales capaces de llevar a cabo la fisión reductiva de los grupos azo. Posteriormente, las aminas aromáticas incoloras que se producen por la fisión requieren condiciones aerobias para su biodegradación (O'Neill et al., 2000; Ekici et al., 2001; Frijters et al., 2006), por tanto deben

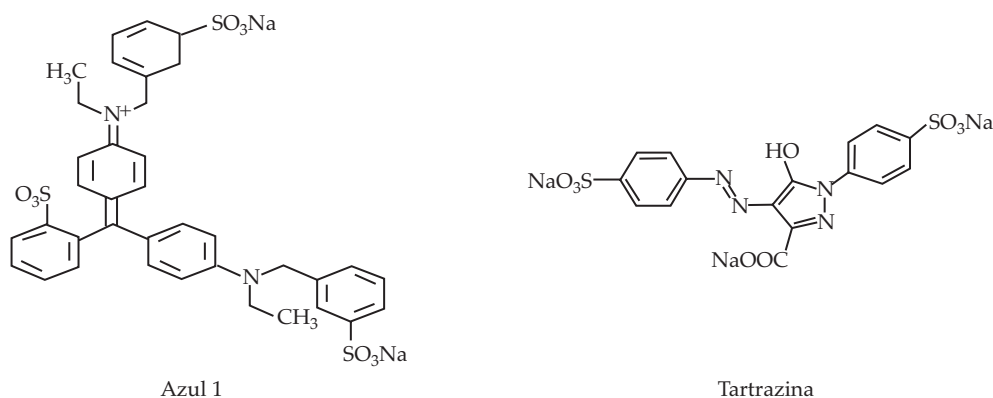


Figura 3. Estructura química de los colorantes de uso alimenticio azul 1 y tartrazina identificados en el efluente del CIRA.

complementarse tratamientos anaerobios y aerobios para alcanzar altas eficiencias en el proceso. No obstante, la velocidad de reducción de los colorante azo en un tratamiento aerobio de este tipo es lenta, requiriendo tiempos de retención hidráulica (TRH) muy largos para alcanzar la eficiencia en la biodegradación, por lo que muchos de este tipo de colorantes permanecen en el agua aún después de ser tratada mediante estos métodos. Por otro lado, siendo el colorante azul 1 un derivado del trifenilmetano, es posible que también su degradación sea lenta en condiciones biológicas anaerobias (Khataee *et al.*, 2008). La presencia de anillos aromáticos en su estructura provoca que la degradación microbiana inicie con los grupos funcionales etilo, sulfitos, y finalice con los enlaces carbono nitrógeno (Van der Zee y Villaverde, 2005), produciendo con este último también aminas aromáticas posiblemente tóxicas que requieran de una degradación posterior, complicando los proceso biológicos.

De esta manera, bajo las condiciones de calidad obtenidas en el tratamiento proporcionado por la planta del CIRA, el efluente no resultó ser apto para su reúso en actividades industriales, justificando su filtración con membranas para producir agua libre de

colorantes, además de la disminución del contenido de distintas sustancias, entre otras características posibles.

#### *Características de filtración de las membranas*

Los datos obtenidos a través de la determinación de las características funcionales de las membranas proporcionaron los intervalos de (PTM) con diferentes valores de ( $v$ ) de operación en la filtración, como una información previa sobre las condiciones favorables del proceso de filtración para obtener los máximos flujos de permeado en un proceso en el que estas membranas sean utilizadas. En los párrafos siguientes se presentan cada uno de los resultados.

#### *Flujo de agua filtrada por las membranas*

Los datos de flujo de agua permeada ( $J_{\text{agua}}$ ) obtenidos a partir del estudio del comportamiento de las membranas se presentan en el cuadro 1 para diferentes valores de (PTM) en los niveles de velocidad de flujo ( $v$ ) de 1.5, 2.5 y 3  $\text{ms}^{-1}$ . La combinación de estas dos variables muestra que los mayores flujos ( $J_{\text{agua}}$ ) son obtenidos cuando ambos tipos de



Cuadro 1. Datos del promedio del flujo de agua permeada ( $J_{\text{agua}}$ ) en  $\text{Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$ , obtenidos para diferentes condiciones de ( $PTM$ ) y ( $v$ ) en la caracterización de las membranas.

Membranas/ umbral de corte	$(v) \text{ ms}^{-1}$											
	1.5				2.5				3			
	$(PTM) \text{ bar}$											
	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5
13	25.89	34.89	38.56	46.45	28.80	45.87	59.77	65.46	28.80	45.90	58.47	55.70
15	8.10	9.43	11.55	12.78	11.87	15.45	17.56	15.21	17.34	24.29	29.34	29.76
50	29.90	35.51	48.89	52.80	30.01	53.32	61.34	65.02	33.01	44.20	55.34	60.92
150	15.10	19.02	23.21	25.65	19.12	22.40	25.23	28.34	26.76	35.51	40.75	46.95

membranas son operadas en el intervalo de 3-5 bar de ( $PTM$ ) y ( $v$ ) entre 2.5-3  $\text{ms}^{-1}$ , lo que indica que con velocidades y presiones bajas no se obtienen altas eficiencias de permeación en las cuatro membranas. Asimismo, se aprecia que en 5 bar, la velocidad de permeación del agua en algunos casos es menor con respecto a lo obtenido para la ( $PTM$ ) de 3-4 bar, debido a que la velocidad de crecimiento de permeación va disminuyendo con el aumento de la ( $PTM$ ), cuando se acerca al límite de la capacidad de permeación. Lo anterior se aprecia en el caso de las membranas poliméricas, donde es notorio que si bien un aumento de ( $v$ ) de 2.5 a 3  $\text{ms}^{-1}$  no favorece a ( $J_{\text{agua}}$ ), en algunos casos tiende a disminuir a medida que la ( $PTM$ ) aumenta, mostrando que tras operar estas membranas a 2.5  $\text{ms}^{-1}$  y no superar los 5 bar es posible obtener mayores flujos de permeación ( $J_{\text{agua}}$ ). Estos resultados fueron considerados en la aplicación de las membranas para el tratamiento del efluente del CIRA. Por otro lado, la influencia de ( $v$ ) sobre la permeación ( $J_{\text{agua}}$ ) de las dos membranas cerámicas muestra que utilizando 3  $\text{ms}^{-1}$  se obtienen los mejores resultados de ( $J_{\text{agua}}$ ), independientemente de la ( $PTM$ ), pero siendo considerable este aumento entre 3-5 bar. Sin embargo, al igual que las poliméricas, mayores valores de la ( $PTM$ ) en el sistema no aumentó el valor de ( $J_{\text{agua}}$ ), lo que significa que en ambos tipos de membranas, el rango de trabajo de esta variable no debe superar a 5 bar.

Con respecto a los valores de ( $J_{\text{agua}}$ ), se encuentra que los mejores resultados de permeación se obtienen a través de las membranas poliméricas, siendo mayor el obtenido con la de 50 KDa, al alcanzar valores máximos de 65  $\text{Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$ , por su umbral de corte; no obstante que la membrana cerámica con 150 KDa debería proporcionar mayores valores de ( $J_{\text{agua}}$ ), y que la de 50 KDa debería a su vez permear mayor flujo que la de 13 KDa, si se parte del hecho de que tamaños de poro más grandes en la membrana dejarían fluir mayor cantidad de agua. Sin embargo, las diferencias en el área de estos tipos de membranas marca el comportamiento de la filtración. Por otro lado, la diferencia entre el funcionamiento de las membranas con respecto a ( $v$ ) y a la ( $PTM$ ) obedece a diferentes factores. Entre ellos se encuentra la resistencia a la circulación del fluido y el límite de operación de la presión en el sistema de filtración, lo cual, a su vez, también depende del área transversal de la membrana, y del material y espesor de la misma. Por tanto, de acuerdo con la naturaleza de las membranas cerámicas, se requiere de mayor valor de ( $v$ ) y ( $PTM$ ) para que tenga lugar la permeación, presentando una mayor resistencia a la transferencia de masa, independientemente de su tamaño de poro. La máxima permeación de agua libre de contaminantes (condición ideal) para las membranas cerámicas se obtiene con una velocidad de flujo de 3  $\text{ms}^{-1}$ , mientras que para las cerámicas fue de 2.5  $\text{ms}^{-1}$ . Otro aspecto

importante a considerar en este resultado es el área de permeación; las membranas poliméricas utilizadas son de fibra hueca y ofrecen una mayor área (mejorando la relación volumen del módulo/área efectiva de la membrana).

#### Punto de carga cero de las membranas

En el cuadro 2 se presentan los valores obtenidos del pH del flujo de permeado ( $\text{pH}_p$ ) proveniente de cada membrana, como resultado de la prueba para la determinación de la naturaleza ácida o alcalina de las membranas. Los datos obtenidos muestran que ambos materiales de las membranas tienden a modificar ligeramente el ( $\text{pH}_p$ ) del agua, para alcanzar valores por encima de 6 unidades en ( $\text{pH}_p$ ), independientemente del valor de ( $\text{pH}_p$ ) en la alimentación. Los mismos valores de ( $\text{pH}_p$ ) del agua fueron obtenidos a partir de la primera muestra del permeado y durante el tiempo en que duró la prueba. La relación ( $\Delta\text{pH}$ ) como función de ( $\text{pH}_p$ ) generó una gráfica como la mostrada en la figura 4, por medio de la cual se obtuvo el valor del ( $\text{pH}_f$ ), resultando en 6.2 unidades de pH para la membrana cerámica y en 6.4 unidades para la membrana polimérica. Estos valores indican el pH, en el cual las cargas superficiales de las membranas se encuentran balanceadas. El ligero aumento del pH del efluente por arriba del ( $\text{pH}_f$ ) muestra que existe poca diferencia entre los valores de ( $\Delta\text{pH}$ ) obtenidos alrededor del intervalo de 6-8 de ( $\text{pH}_p$ ), lo que permite que exista flexibilidad para que se conserve el pH del efluente sin que se presenten problemas funcionales mayores por interacciones entre la superficie de la membrana y las partículas contenidas en el efluente. Por tanto, es posible afirmar que en este intervalo, el pH del efluente y el material de las membranas no afectarán la capacidad de permeación durante el proceso. Sin embargo, a pH extremo, la membrana en uso puede cargarse positiva o negativamente, contribuyendo al comportamiento temprano del fenómeno de polarización, concentración que tiene lugar en la superficie de la membrana

por efecto de la carga y pH del efluente, principalmente. Con el fin de asegurar flujos continuos de permeación sin pérdidas tempranas de caudal por variaciones en el pH del efluente, se debe tener cuidado en que se conserve el intervalo mencionado para evitar la retención o formación de capas de polarización en estas membranas, aun cuando la concentración de los solutos en el efluente sea baja (De la Casa, 2006; Ibáñez, 2006). Por otro lado, este fenómeno también puede ser reducido si las condiciones de operación como ( $\text{PTM}$ ), ( $v$ ) y el tiempo de operación de las membranas es el adecuado, evitando los valores pequeños de flujo de permeado con bajas eficiencias en el proceso de filtración y daños, incluso irreversibles en la membrana (Muro et al., 2009).

#### Evaluación del proceso de membranas para la recuperación de agua del efluente del CIRA

Los resultados obtenidos de la aplicación del proceso de filtración del efluente del CIRA se presentan para las cuatro membranas de prueba conforme a los parámetros de calidad del agua recuperada; el caudal de permeación y el tiempo en que la filtración puede llevarse a cabo en forma continua.

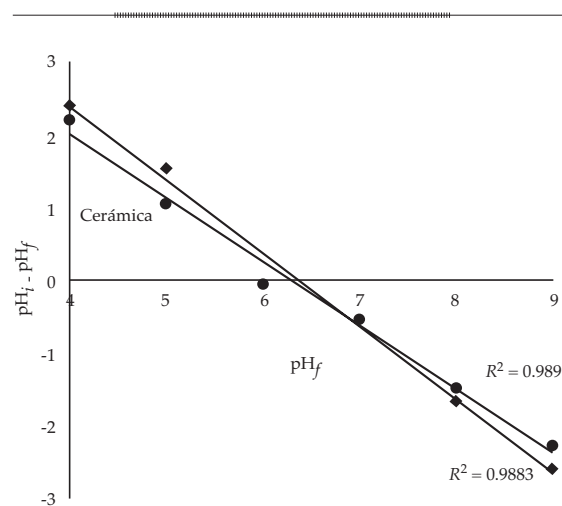


Figura 4. ( $\text{pH}_f$ ) de las membranas cerámicas y poliméricas.

Cuadro 2. Valores promedio de  $pH_p$  del agua permeada por las membranas a través de la variación de  $pH_f$  del agua alimentada.

$pH_f$	$pH_p$	
	Cerámica	Polimérica
4	6.73	6.42
5	6.51	6.35
6	6.41	6.45
7	5.94	6.13
8	6.06	6.51
9	6.19	6.40

#### Calidad del agua recuperada por las membranas

En el cuadro 3 se presentan los datos obtenidos con respecto a la calidad del agua permeada en el proceso de filtración, a través de variar la (PTM) en un intervalo de 3 a 5 bar, y utilizar (v)

de 2.5 y 3  $ms^{-1}$  para las membranas poliméricas y cerámicas, respectivamente. De los datos del cuadro 3 se hace notar la disminución en los valores de todos los parámetros de calidad del efluente del CIRA una vez que fue tratado por cada una de las cuatro membranas utilizadas. En todos los casos, la eficiencia del proceso de filtración fue alta, debido a que la elección de las membranas y las condiciones de operación fueron las adecuadas para llevar a cabo el proceso. Se resalta que los mejores valores de calidad del agua recuperada se obtuvieron entre 3 y 4 bar, alcanzando altas eficiencias en el tratamiento de filtración. Sin embargo, la remoción total de los colorantes y de la mayoría de los solutos contenidos en el efluente se alcanzaron con la membrana de 15 KDa; siguiendo en ese orden de eficiencia, la de 13 KDa, independientemente de la (PTM) utilizada en el rango de trabajo analizado y de las diferentes mezclas que se presentaron entre los colorantes.

Cuadro 3. Promedio de los valores obtenidos en los parámetros de calidad del agua recuperada del efluente del CIRA por cada membrana, utilizando diferentes condiciones de (PTM).

Parámetros	Membranas											
	Poliméricas/umbral de corte (KDa)						Cerámicas/umbral de corte (KDa)					
	50			13			15			150		
	(PTM) bar											
	3	4	5	3	4	5	3	4	5	3	4	5
pH	7.8	7.7	7.8	7.7	7.4	7.4	7.5	7.7	7.8	7.9	7.9	7.6
Conductividad ( $\mu S$ )	1 530	1 517	1 525	1 425	1 400	1 439	1 196	1 027	1 274	1 298	1 314	1 356
Turbiedad (UNT)	5.9	4.8	5.3	5.2	4.6	5.8	2.1	1.8	1.9	4.1	3.0	3.3
DQO ( $mg l^{-1}$ )	78	70	94	37	32	49	24	28	34	55	50	66
ST ( $gl^{-1}$ )	0.96	0.95	0.98	0.53	0.98	0.88	0.64	0.50	0.73	0.87	0.82	0.6
Azul 1 ( $mg l^{-1}$ )	0.033	0.03	0.28	0.003	0.015	0.268	0.00	0.00	0.01	0.09	0.04	0.10
Tartrazina ( $mg l^{-1}$ )	0.022	0.01	0.077	0.012	0.002	0.058	0.00	0.00	0.00	0.05	0.018	0.067
$Na^{1+}$ ( $mg l^{-1}$ )	138	125	156	120	118	125	125	123	135	146	141	166
$K^{1+}$ ( $mg l^{-1}$ )	18	20	25	16	23	24	17	20	22	23	25	35
$Ca^{2+}$ ( $mg l^{-1}$ )	15	17	17	15	14	16	12	13	15.8	16.2	16.8	17
$Fe^{3+}$ ( $mg l^{-1}$ )	5.1	5.9	5.5	4.9	3.8	3.8	4.6	5.7	2.1	7.3	6.4	9.9

El colorante tartrazina fue completamente removido por las cuatro membranas, mientras que para el azul 1, las membranas de 150 y 50 KDa no presentaron el mismo resultado. Esta diferencia se debe a que el peso molecular del azul 1 es menor que el de la tartrazina, por lo que posiblemente el umbral de corte de estas membranas influyó en los resultados obtenidos, mostrando una menor capacidad de retención por la masa molecular de este colorante. Con respecto al contenido de iones en los permeados, su identificación corroboró que la alta conductividad del efluente del CIRA mostró la permanencia de sales de estos iones aun después del tratamiento biológico, e incluso iones monovalentes como  $\text{Na}^{1+}$  y  $\text{K}^{1+}$  quizá no fueron completamente removidos por las membranas con umbrales de corte de 150 y 50 KDa. A través de las membranas de 13 y 15 KDa se alcanzaron mayores retenciones de estos iones, incluyendo los de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ , cuyas concentraciones son mínimas en los permeados obtenidos por estas membranas. En general, con los resultados alcanzados de remoción, es presumible que el umbral de corte de las membranas de UF seleccionadas para el tratamiento y las condiciones de operación sean las adecuadas para mejorar la calidad del agua. Particularmente, la remoción de los colorantes y la disminución de conductividad por la retención de sustancias iónicas divalentes y trivalentes es alcanzable siempre que el proceso sea operado de 3-4 bar.

Se mencionan diferentes resultados en trabajos de aplicación de membranas para el tratamiento de efluentes. La calidad del agua que se produce depende de la calidad del efluente y de las membranas. A través del estudio de las características del efluente y del grado de remoción que se requiere o del tipo de partículas que se desean remover, se establecen membranas de MF, UF, NF y OI, o sistemas continuos de filtración para llevar a cabo el tratamiento. Pese a la diferencia en las condiciones en que se utilizan los procesos de membranas, los resultados de

este trabajo coinciden en la calidad del agua y los rendimientos de recuperación del 80 al 98%, para procesos de UF. Por ejemplo, en la producción de harina de pescado y en agua de proceso de surimi, se probaron diferentes procesos de MF, UF y NF, encontrando que mediante membranas de MF y UF se recupera agua para la limpieza del equipo y tuberías de la industria, mientras que los procesos de NF recuperaron agua para uso en torres de enfriamiento (Alfonso y Bórquez, 2002, 2003). Trabajos recientes también muestran la capacidad de membranas de UF para tratar los efluentes de una industria de aceite de oliva y de una empacadora de tomate (Akdemir y Ozer, 2009; Iaquinta *et al.*, 2009). En ambos casos, se desarrolló un sistema de NF y OI para producir agua libre de colorantes y sales para reúso en el proceso. La calidad del agua mejora notablemente por la aplicación de procesos de NF y OI, al separar pequeñas partículas difíciles de remover por otros procesos. Por ejemplo, en Noronha *et al.* (2002), se menciona la producción de agua a través del tratamiento de efluentes provenientes del proceso de una industria de bebidas. El tratamiento fue realizado en un biorreactor de membranas de NF, obteniendo agua con calidad para su reutilización en el mismo proceso. En este caso, la eliminación de iones y disminución de DQO fue el objetivo del proceso. Membranas de NF y baja presión en OI también se utilizaron en la misma industria, para tratar el agua de lavado de las botellas de envasado. En este caso se menciona que la calidad del agua obtenida fue similar al agua potable, marcando un estricto control en la DQO (Mavrov *et al.*, 1997). En otro trabajo de Mavrov y Bélières (2000), el agua de refrigeración de embutidos fue tratada también por procesos de NF para producir agua con calidad de agua potable para ser reutilizada en el mismo proceso de refrigeración. Chmiel *et al.* (2000) demostraron que procesos de NF y OI producen agua reutilizable con calidad a la del vapor condensado a partir del efluentes tratados de la industria láctea.

### Caudal de flujo de agua recuperada en la filtración del efluente

El comportamiento de las membranas en el tratamiento del efluente del CIRA se presenta en la figura 5, donde se ha incluido el caudal de permeación ( $J_{\text{agua}}$ ) obtenido por la filtración ideal del agua libre de carga de acuerdo con los datos del cuadro 1 y los resultados del agua recuperada ( $J_p$ ) por la filtración del efluente, tras variar la ( $PTM$ ) en ambos procesos. La finalidad es apreciar la desviación en la permeación que se presenta en las membranas cuando es tratado el efluente. En referencia a esta figura, se observa que los mayores flujos de agua recuperada ( $J_p$ ) se obtuvieron en las membranas poliméricas. Los flujos fueron muy cercanos a  $35 \text{ Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$ , con poca variación en este valor para ambas membranas, a pesar de la diferencia en el umbral de corte de 13 y 50 KDa. La caída en el caudal de permeación ( $J_p$ ), por el aumento de la ( $PTM$ ), muestra que estas dos membranas son saturadas por las sustancias contenidas en el efluente cuando la ( $PTM$ ) supera a 3 bar, manteniendo caídas de ( $J_p$ ) de hasta  $30 \text{ Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$ . En el caso de las membranas cerámicas, el máximo caudal ( $J_p$ ) se alcanzó en 4 bar con  $28 \text{ Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$ ; la caída en ( $J_p$ ) y la desviación entre los flujos ( $J_{\text{agua}}$ ) y ( $J_p$ ) obtenidos por las membranas cerámicas en 5 bar fue aproximadamente de  $12 \text{ Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$ , mostrando que estas membranas son más estables a la variación de la ( $PTM$ ). Por tanto, flujos ( $J_p$ ) constantes y menos problemas de polarización fueron encontrados en las membranas cerámicas, mostrando mayor estabilidad en la permeación de agua como resultado del tratamiento del efluente. Al respecto, se encontró que bajo las condiciones favorables de ( $PTM$ ) y ( $v$ ), la membrana cerámica con 150 KDa proporcionó flujos constantes ( $J_p$ ) durante 190 min, continuando la de 15 KDa con 165 minutos, y finalmente las poliméricas dieron flujos estables durante 130 y 120 minutos de operación. Los datos obtenidos de este estudio explican que las características y naturaleza de las membranas fueron determinantes

para obtener eficientes flujos de agua con las características de calidad ya mostradas. La diversidad de tamaño de partículas contenidas en el efluente del CIRA y sus altos valores de DQO fueron considerados para la selección de las membranas de prueba. Pequeños poros en membranas con bajos umbrales de corte son rápidamente saturados y bloqueados por esta condición, en comparación con aquellas de umbral de corte mayor. Principalmente estas condiciones fueron analizadas y balanceadas para la eliminación de los colorantes y las sales, entre otras sustancias de menor peso molecular. Sin embargo, en un proceso de membranas, la calidad de agua obtenida no es el único parámetro de interés; la producción de flujos de agua y el efecto del estrés con la que se opera la membrana son factores que se incluyen en la selección de las membranas, para desarrollar un proceso de tratamiento de efluentes.

Por otro lado, aun cuando el proceso de filtración se llevó a cabo en el intervalo permitido del ( $pcz$ ) de las membranas, el pH del efluente pudo influir en la caída del flujo de permeación ( $J_p$ ) en las membranas poliméricas, por posibles fenómenos de interacción y de adsorción de sales o precipitación de  $\text{Ca}^{2+}$  en la superficie, aumentando el fenómeno de colmatación inherente en estos procesos. En las membranas cerámicas, los resultados mostraron que ambos umbrales de corte presentaron mayor capacidad para el rechazo de la carga del alimento, favoreciendo la permeación del agua. Finalmente, con respecto a las condiciones de operación seleccionadas para el tratamiento del efluente, se menciona que la funcionalidad de las membranas en las condiciones en que fueron operadas fue suficiente para encontrar una buena estabilidad en el proceso, con tiempos prolongados de filtración, aceptados caudales de permeación ( $J_p$ ) y calidad en el agua recuperada.

Bajo estos resultados, las cuatro membranas cumplieron con algunos aspectos que determinaron su eficiencia en el tratamiento; en todos los casos, se removieron los colorantes



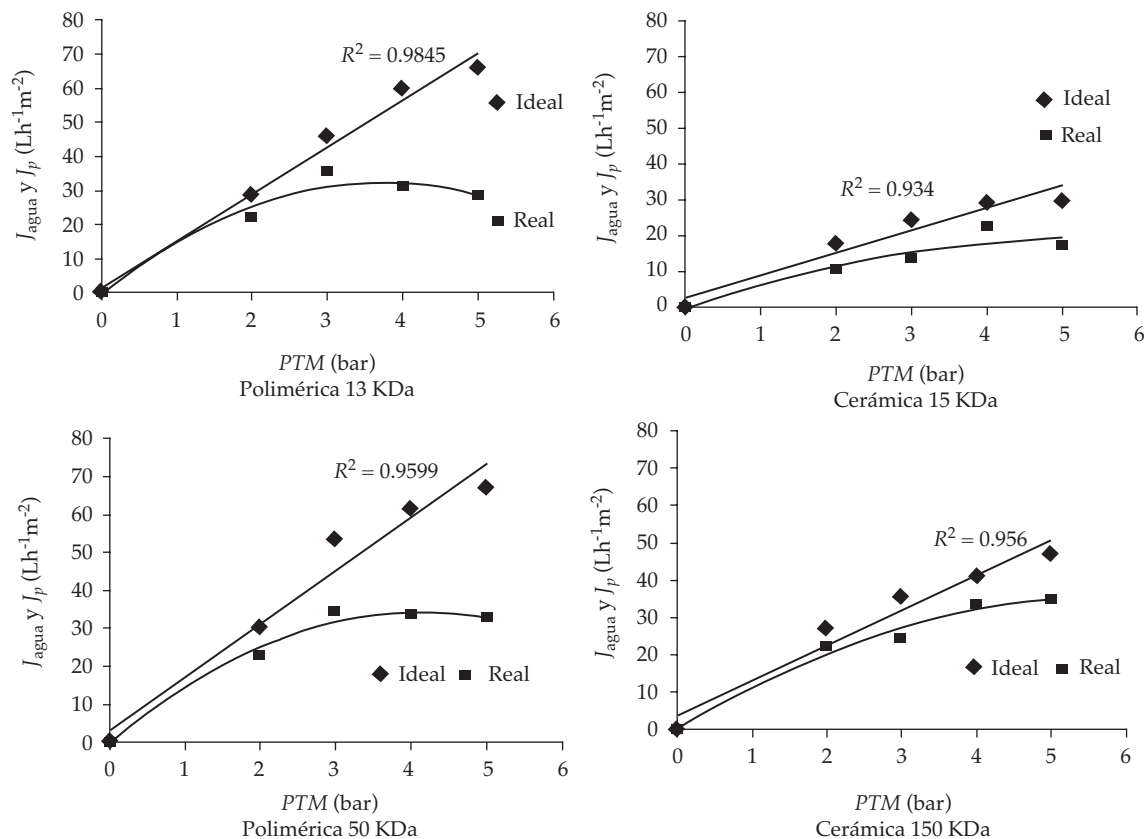


Figura 5. Flujo de permeado de agua libre de carga ( $J_{\text{agua}}$ ) y del agua recuperada del efluente del CIRA ( $J_p$ ), mostrando el comportamiento ideal y real en función de la (PTM) con ( $v$ ) de 2.5 y 3  $\text{ms}^{-1}$  para las membranas poliméricas y cerámicas, respectivamente.

y se disminuyeron en gran medida los valores en todos los parámetros de contaminación, destacando las membranas de 15 y 13 kDa en orden de eficiencia. Sin embargo, a través de la membrana polimérica con 13 kDa, se obtuvieron flujos mayores de agua, mientras que la mayor estabilidad operativa se presentó en la membrana cerámica de 15 kDa.

De acuerdo con el cuadro 4, los requerimientos de calidad del agua establecidos por la industria indican que las membranas de 15 y 13 kDa pueden ser utilizadas cuando el fin del tratamiento del efluente sea la recuperación de agua para suministro en la caldera y/o de limpieza del equipo. Sin embargo, los rendimientos en los flujos de permeación y la

estabilidad de estas dos membranas también tendrá que ser considerada en la elección de la que podría ser sugerida para un tratamiento continuo con paros y arranques regidos por estos aspectos.

## Conclusiones

En el proceso de recuperación de agua, a partir de la ultrafiltración de los efluentes del CIRA, se encontró que dos de las cuatro membranas evaluadas resultaron eficientes para recuperar agua con calidad de reúso en actividades de lavado de equipo industrial y agua para suministro de calderas. Las condiciones de operación que se encontraron

Cuadro 4. Calidad del agua requerida para algunas actividades industriales.

Tipo de agua/ calidad	Parámetros								
	Conductividad $\mu\text{Scm}^{-1}$	Turbiedad UNT	DQO $\text{mg l}^{-1}$	ST $\text{gl}^{-1}$	Colorantes $\text{mg l}^{-1}$	$\text{Na}^+$ $\text{mg l}^{-1}$	$\text{K}^+$ $\text{mg l}^{-1}$	$\text{Ca}^{2+}$ $\text{mg l}^{-1}$	$\text{Fe}^{3+}$ $\text{mg l}^{-1}$
Caldera	< 1 200	< 5	< 40	1.0	0	< 130	< 25	< 150	< 5
Limpieza de equipos	< 1 000	< 5	< 30	1.0	0	< 120	N/E	N/E	< 3

para alcanzar estos resultados fueron (PTM) de 3-4 bar y velocidad de flujo de 2.5-3  $\text{ms}^{-1}$ . La mayor eficiencia en la calidad del agua fue obtenida por las membranas de 15 y 13 kDa, mientras que las membranas de 150 y 50 kDa fueron suficientes para eliminar colorantes y disminuir la DQO entre otros parámetros; en este caso, su reúso en la industria no fue definido. Sin embargo, los valores de algunos parámetros se encuentran indirectamente dentro de los rangos que determinan la calidad de agua dulce, como la turbiedad, SST y el contenido de hierro, sodio y calcio, pero con DQO y conductividad aún por encima de los rangos que caracterizan este tipo de agua.

Por otro lado, los mayores caudales de agua permeada se obtuvieron con las membranas poliméricas, alcanzando valores muy cercanos a 35  $\text{Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$ . A este resultado le siguió la de 15 kDa, con 28  $\text{Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$ . Con respecto al funcionamiento operativo de las membranas, las cerámicas presentaron mayor estabilidad, produciendo flujos continuos de agua durante 150 minutos, retardando el problema de polarización, por lo que la membrana de 15 kDa requiere menos periodos de mantenimiento, pero con flujos menores de permeación. Es recomendable que en la elección de la membrana para su implementación en el ámbito industrial se consideren los diferentes niveles de calidad del agua, flujos obtenidos y estabilidad de las membranas, para elegir aquella que cumpla con la disposición del agua recuperada y otros aspectos que deberán discutirse, como el costo, la limpieza, y los tiempos de paro y arranque

necesarios para conservar la funcionalidad de la membrana.

### Agradecimientos

Este trabajo se llevó a cabo gracias al apoyo del Centro Interamericano de Recursos del Agua y la Subsecretaría de Educación Superior, a través del Programa de Mejoramiento del Profesorado para el Fortalecimiento de los Cuerpos Académicos, a través del proyecto *Evaluación de los procesos de sorción y ultrafiltración en la remoción de colorantes*.

Recibido: 02/08/10  
Aceptado: 30/01/12

### Referencias

- ALFONSO, M. and BÓRQUEZ, R. Review of the treatment of seafood processing wastewaters and recovery of proteins therein by membrane separation processes-prospects of the ultrafiltration of wastewaters from the fish meal industry. *Desalination*. Vol. 142, No. 1, January, 2002, pp. 29-45.
- ALFONSO, M. and BÓRQUEZ, R. Nanofiltration of wastewaters from the fish meal industry. *Desalination*. Vol. 151, No. 2, January, 2003, pp. 131-138.
- AKDEMIR, E.O. and OZER, A. Investigation of two ultrafiltration membranes for treatment of olive oil mill wastewater. *Desalination*. Vol. 249, No. 2, December, 2009, pp. 660-666.
- ALLEGRE, C., MOULIN, P., MAISSEAU, M., and CHARBIT, F. Treatment and reuse of reactive dyeing effluents. *Journal of Membranes Science*. Vol. 269, No. 4, February, 2006, pp. 15-34.
- ALLEN, S.J. and KOUMANOVA, B. Decolourisation of Water Wastewater Using Adsorption. *Journal of the University Chemical Technology and Metallurgy*. Vol. 40, No. 3, July, 2005, pp. 175-192.

- APHA. Greenberg A. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 21<sup>th</sup> ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2005.
- ARREGUÍN, F.I. y MARTÍN, A. Desalinización del agua. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XV, núm. 1, enero-abril de 2000, pp. 27-49.
- BENÍTEZ, F.J., ACERO, L.J., and LEAL, I.A. Application of microfiltration and ultrafiltration processes to cork processing wastewaters and assessment of the membrane fouling. *Separation and Purification Technology*. Vol. 50, No. 2, July, 2006, pp. 354-364.
- BENÍTEZ, F.J., ACERO, L.J., LEAL, I.A., and GONZÁLEZ, M. The use of ultrafiltration and nanofiltration membranes for the purification of cork processing wastewater. *Filtration and Separation*. Vol. 162, No. 2, March, 2009, pp. 1438-1445.
- CABASSUD, C., ANSELME, C., BERSILLON, J., and APTEL, P. Ultrafiltration as a nonpolluting alternative to traditional clarification in water treatment. *Filtration and Separation*. Vol. 28, No. 3, May, 2001, pp. 194-198.
- CALVO, L., GILARRAN, M.A., CASAS, J.A., MOHEDANO, A.F., and RODRIGUEZ, J.J. Detoxification of Kraft pulp ECF bleaching effluents by catalytic hydrotreatment. *Water Research*. Vol. 41, No. 4, February, 2007, pp. 915-923.
- CHEIMA, F., LASSAAD, G., and MAHMOUD, D. Treatment of textile effluents by membrane technologies. *Desalination*. Vol. 185, No.1, November, 2005, pp. 399-409.
- CHEN, H.H., YEHB, H.H., and SHIAUC, S. The membrane application on the wastewater reclamation and reuse from the effluent of industrial WWTP in northern Taiwan. *Desalination*. Vol. 185, No. 1, November, 2005, pp. 227-233.
- CHMIEL, H., MAVROV, V., and BÉLIÈRES, E. Reuse of vapour condensate from milk processing using nanofiltration. *Filtration & Separation*. Vol. 37, No. 3, April, 2000, pp. 24-27.
- DE FLORIO, L., GIORDANO, A., and MATTIOLI, D. Nanofiltration of low-contaminated textile rinsing effluents for on-site treatment and reuse. *Desalination*. Vol. 181, No. 1, September, 2005, pp. 283-292.
- DE LA CASA, G.E. *Estudio de las interacciones proteína-membrana en los procesos de filtración tangencial*. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería Química. Granada: Universidad de Granada, 2006, 246 pp.
- EKICI, P., LEUPOLD, G., and PARLAR H. Degradability of selected azo dye metabolites in activated sludge systems. *Chemosphere*. Vol. 44, No. 4, August, 2001, pp. 721-728.
- FARIA, P.C., ÓRFAÑO, J.J., and PEREIRA, M.F. Mineralization of coloured aqueous solutions by ozonation in the presence of activated carbon. *Water Research*. Vol. 39, No. 8, April, 2005, pp. 1461-1470.
- FDA. Administración de Alimentos y Fármacos. 2008. Disponible para World Wide Web: <http://www.fda.gov.com>
- FORGACS, E., CSERHÁTI, T., and OROS, G. Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environment International*. Vol. 30, No. 7, September, 2004, pp. 953-971.
- FRIJTERS, R.H., VOS, R.H., SCHEFFER, G., and MULDER, R. Decolorizing and detoxifying textile wastewater, containing both soluble and insoluble dyes, in a full scale combined anaerobic/aerobic system. *Water Research*. Vol. 40, No. 6, March, 2006, pp. 1249-1257.
- GUOTING, L., JIUHUI, Q., XIWANG, Z., and JIANTUAN, G. Electrochemically assisted photocatalytic degradation of Acid Orange 7 with  $\beta$ -PbO<sub>2</sub> electrodes modified by TiO<sub>2</sub>. *Water Research*. Vol. 40, No. 2, January, 2006, pp. 213-220.
- GUPTA, S., DEY, B., HASHIM, M., and HASAN, B. Microfiltration of water-based paint effluents. *Advances in Environmental Research*. Vol. 8, No. 3, March, 2004, pp. 455-466.
- IAQUINTA, M., STOLLER, M., and MERLI, C. Optimization of a nanofiltration membrane process for tomato industry wastewater effluent treatment. *Desalination*. Vol. 245, No. 1-3, September, 2009, pp. 314-320.
- IBÁÑEZ, L.R. *Estudio de la ultrafiltración de proteínas modelo con membranas cerámicas*. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería Química. Granada: Universidad de Granada, 2006, 319 pp.
- KHATAEE, A., VATANPOUR, V., and FARAJZADEH, M.R. Remediation of the Textile Dye Brilliant Blue FCF from Contaminated Water via a Fenton-Like Reaction: Influence of Aromatic Additives. *Turkish Journal Engineering Environmental Science*. Vol. 32, No. 4, December, 2008, pp. 367-376.
- KOYUNCU, I. An advanced treatment of high-strength opium alkaloid processing industry wastewaters with membrane technology: pretreatment, fouling and retention characteristics of membranes. *Desalination*. Vol. 155, No. 3, July, 2003, pp. 265-275.
- LEE, J.W., CHOI, S.P., THIRUVENKATACHARI, R., SHIM, W.G., and MOON, H. Evaluation of the performance of adsorption and coagulation processes for the maximum removal of reactive dyes. *Dyes and Pigment*. Vol. 69, No. 3, April, 2006, pp. 196-203.
- LOPES, C., PETRUS, J., and RIELLA, H. Color and COD retention by nanofiltration membranes. *Desalination*. Vol. 172, No. 1, February, 2005, pp. 77-83.
- MARCUCCI, M., NOSENZO, G., CAPANNELLIC, G., CIABATTI, I., CORRIERI, D., and CIARDELLI, G. Treatment and reuse of textile effluents based on new ultrafiltration and other membrane technologies. *Desalination*. Vol. 138, No. 1, September, 2001, pp. 75-82.
- MARCUCCI, M., NOSENZO, G., MATTEUCCI, A., RANIERI, L., and RUSSO, M. Experimental campaigns on textile wastewater for reuse by means of different membrane processes. *Desalination*. Vol. 149, No. 1, September, 2002, pp. 137-143.

- MAVROV, V., FÄHNRIK, A., and CHMIEL, H. Treatment of low-contaminated waste water from the food industry to produce water of drinking quality for reuse. *Desalination*. Vol. 113, No. 2-3, November, 1997, pp. 197-203.
- MAVROV, V. and BÉLIÉRES, E. Reduction of water consumption and wastewater quantities in the food industry by water recycling using membrane processes. *Desalination*. Vol. 131, No. 1-3, December, 2000, pp. 75-86.
- MULLET, M., FIEVET, P., SZYMCZYK, A., FOISSY, A., REGGIANI, J.C., and PAGETTI J.A. Simple and accurate determination of the point of zero charge of ceramic membranes. *Desalination*. Vol. 121, No. 1, January, 1999, pp. 41-48.
- MURO, C.R., ESCOBAR, J., ZAVALA, R.E., ESPARZA, M., CASTELLANOS, J., GÓMEZ, R.M. y GARCÍA, M. Evaluación del proceso de microfiltración en un efluente residual de una industria alimenticia para su reuso. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Vol. 25, núm. 4, diciembre de 2009, pp. 229-238.
- MUTLUA, S., YETISB, U., GURKANA, T., and YILMAZA, L. Decolorization of wastewater of a baker's yeast plant by membrane processes. *Water Research*. Vol. 36, No. 3, February, 2002, pp. 609-616.
- NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua-Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba.
- NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua-determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas-Método de prueba.
- NMX-AA-003-1980. Norma Mexicana que establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales.
- NORONHA, M., BRITZ, T., MAVROV, V., JANKE, H.D., and CHMIEL, H. Treatment of spent process water from a juice company for purpose of reuse: hybrid process concept and on-site test operation of a pilot plant. *Desalination*. Vol. 143, No. 2, May, 2002, pp. 183-196.
- OFOMAJA, A.E. and HO, Y.S. Equilibrium sorption of anionic dye from aqueous solution by palm kernel fibre as sorbent. *Dyes and Pigments*. Vol. 74, No. 1, September, 2006, pp. 60-66.
- O'NEILL, C., LOPEZ, A., ESTEVES, S., HAWKES, F.R., HAWKES, D. L., and WILCOX, S. Azo-dye degradation in an anaerobic-aerobic treatment system operating on simulated textile effluent. *Applied Microbiology and Biotechnology*. Vol. 53, No. 2, February, 2000, pp. 249-254.
- RAMÍREZ-ACOSTA, R. de J. y MENDOZA-ESPINOZA, L.G. Factibilidad financiera del reuso de aguas residuales tratadas en Tijuana, Baja California bajo el mecanismo del mercado: el caso del proyecto Monte de los Olivos. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XIX, núm. 3, julio-septiembre de 2004, pp. 123-127.
- RIBEIRA, R., BERGAMASCO, R., and GIMENES, M. Membranes synthesis study for colour removal of a textile effluent. *Desalination*. Vol. 145, No. 1, September, 2002, pp. 136-143.
- SEVAL, K.A., ASKIN, B., GÖKHAN, E.Ü., and TANER, Y. Colour and COD removal from textile effluent by coagulation and advanced oxidation processes. *Coloration Technology*. Vol. 122, No. 2, March, 2006, pp. 102-109.
- SUEN, S., LIU, C., SHIOU, J., CHIEH, H., and CHU, K. Removal of anionic reactive dyes from de water using anion exchange membranes as adsorbers. *Water Research*. Vol. 41, No. 7, April, 2007, pp. 1491-1500.
- VAN DER ZEE, F.P. and VILLAVERDE S. Combined anaerobic-aerobic treatment of azo dyes. A short review of bioreactor studies. *Water Research*. Vol. 39, No. 8, April, 2005, pp. 1425-1440.

## Abstract

ESCOBAR-JIMÉNEZ, J., MURO-URISTA, C., ESPARZA-SOTO, M., GÓMEZ-ESPINOZA, R.M., DÍAZ-NAVA, C., GARCÍA-GAITÁN, B., ORTEGA-AGUILAR, R.E. & ZAVALA-ARCE, R.E. Use of membranes to recover effluent water from the cereal industry. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. III, No. 3, July-September, 2012, pp. 65-82.

The tangential filtration process with effluent membranes was evaluated for the recovery of water for reuse in industrial activities. The membranes were previously treated using biological methods in the experimental plant at the Inter-American Center for Water Resources (ICWR). The most notable effluent characteristics included high turbidity, the presence of two synthetic food dyes-blue brilliant and tartrazine-which were responsible for several green water curtains, and the presence of salts and organic matter with DQO values considered high for the reuse of water. During the evaluation of the filtration process, two ceramic membranes with a cut-off of 150 and 15 kDa and two polymeric hollow fiber membranes with a cut-off of 50 and 13 kDa were tested; these were individually incorporated into pilot-scale filtration equipment. Each process determined the effect of the transmembrane pressure, the water flux velocity and the characteristics of the membranes with the obtained filtered water flux and water quality. The results of the filtration of the effluent from the ICWR showed that the 15 kDa and 13 kDa membranes were the most effective for treating the ICWR effluent in terms of obtaining the water quality parameters needed to clean industrial equipment and supply water to boilers. Nevertheless, the water flux recovered from the effluent was greater with the 13 kDa membrane, reaching  $35 \text{ Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$  during 120 minutes. The most stable membrane was the 15 kDa, which recovered  $28 \text{ Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$  of water during 190 minutes with no polarization problems.

**Keywords:** recovery of water, cereal industry, membranes, dyes.

## Dirección institucional de los autores

Dr. Jesús Escobar Jiménez  
Dra. Claudia Muro Urista  
Dra. Carmen Díaz Nava  
M.C. Rosa Elena Ortega Aguilar

Instituto Tecnológico de Toluca  
División de Estudios de Posgrado e Investigación  
Avenida Tecnológico s/n, colonia Exrancho La Virgen  
52140 Metepec, Estado de México, MÉXICO  
Teléfonos: +52 (457) 2239 49813 y +52 (722) 2087 224  
escobar031976@hotmail.com, cmuro@ittoluca.edu.mx  
cardinava@yahoo.com, reortega@ittoluca.edu.mx

Dr. Mario Esparza Soto

Centro Interamericano de Recursos del Agua  
Universidad Autónoma del Estado de México  
Carretera Toluca-Atlaconulco, km 14.5  
Unidad San Cayetano  
50200 Toluca, Estado de México, MÉXICO  
Teléfono: +52 (722) 2965 550  
Fax: +52 (722) 2965 555  
mesparzas@uaemex.mx y  
mario\_esparza\_soto@hotmail.com

Dra. Rosa María Gómez Espinoza

Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable  
Universidad Autónoma del Estado de México  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Química  
Carretera Toluca-Atlaconulco, km 14.5  
Unidad San Cayetano,  
50200 Toluca, Estado de México, MÉXICO  
Teléfono: +52 (722) 2766 611, extensión 7722  
rosamarigo@gmail.com

Dra. Beatriz García Gaitán

Instituto Tecnológico de Toluca  
Bosques de la Concordia 2113  
San Jerónimo Chicahualco  
52140 Mepetec, Estado de México, MÉXICO  
Teléfonos: +52 (457) 2239 49813 y (722) 2087 224  
beatrizgmx@yahoo.com

Dra. Rosa Elvira Zavala Arce

Instituto Tecnológico de Toluca  
División de Estudios de Posgrado e Investigación  
Avenida Tecnológico s/n, colonia Exrancho La Virgen  
52140 Metepec, Estado de México, MÉXICO  
Teléfono: +52 (722) 2087 224  
Fax: +52 (722) 2087 224  
rzavala@ittoluca.edu.mx y zavalaa@uaemex.com