

REMOCIÓN DE ARSÉNICO MEDIANTE PROCESOS DE MEMBRANA

• César Calderón-Mólgora •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

• María Laura Quezada-Jiménez • Norberto Segura-Beltrán •
Investigadores independientes

• Carlos Hernández-Yañez •
Fondo Metropolitano de la Laguna, México

Resumen

Con el objeto de verificar la viabilidad técnica y económica de potabilizar mediante procesos de membrana agua contaminada con arsénico, se llevaron a cabo pruebas de tratabilidad utilizando pilotos de coagulación-microfiltración (C-MF) y de nanofiltración (NF) en un pozo, cuya concentración promedio de arsénico fue de 67 µg/l y la conductividad promedio de 975 µS/cm. Durante la operación de los pilotos se midió el arsénico en el agua cruda y tratada, además de otros parámetros fisicoquímicos, para determinar la eficiencia de los procesos. También se cuantificaron los insumos necesarios para la operación continua de los equipos, incluyendo reactivos, refacciones, energía eléctrica consumida y los costos asociados con la disposición de residuos; esto se relacionó con el volumen producido para obtener como base de comparación el precio por metro cúbico de agua tratada. Los pilotos operaron a su capacidad máxima de producción: 1 l/s para NF y 2 l/s para MF. En ambos casos, el agua tratada presentó concentraciones de arsénico inferiores al límite máximo permisible por la normatividad vigente en el país (25 µg/l) y, en la mayoría de las muestras, menores que el valor guía recomendado por la OMS (10 µg/l). Ambos procesos son eficaces para el control del arsénico: la C-MF tiene un costo de operación 2.76 veces menor que el de la NF y un costo de inversión 30% mayor. La C-MF se recomienda para aguas cuyo único contaminante sea el arsénico; la NF es adecuada cuando, además del arsénico, otras sustancias comprometen la calidad del agua.

Palabras clave: arsénico, coagulación, membranas, microfiltración, nanofiltración.

Introducción

La presencia geológica de arsénico en distintos acuíferos de la república mexicana y el aprovechamiento intensivo de las aguas subterráneas han tenido como consecuencia que el agua de suministro a distintas ciudades y poblaciones del país contenga este metaloide en concentraciones superiores a los límites máximos permisibles consignados en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (2000) Agua para uso y

consumo humano. Los efectos del arsénico en la salud han sido señalados y documentados por muchos investigadores e instituciones (NRC, 1999; IARC, 2004; WHO, 2004; IRIS, 2007), por lo que no se abundará sobre ellos en este trabajo; baste señalar que la remoción del arsénico del agua de suministro es un asunto de interés público para evitar afectaciones a la salud de los usuarios de los servicios del agua potable.

Por otra parte, muchos organismos operadores de los sistemas de agua potable del país

enfrentan problemas económico-financieros, derivados de la dificultad que tienen para recaudar el importe facturado a los usuarios por el servicio de suministro de agua. Debido a ello, las autoridades del agua de los tres niveles de gobierno demandan soluciones prácticas y económicas para entregar agua libre de arsénico a los domicilios de los usuarios. Asimismo, la oferta tecnológica abarca procesos de adsorción, electroquímicos, fisicoquímicos y de membranas. La efectividad de dichos procesos es alta, pero la viabilidad de su aplicación para un caso específico debe evaluarse minuciosamente, ya que los costos de inversión son distintos para cada una de las ofertas tecnológicas y los costos de operación no siempre van en proporción directa a la inversión.

Los procesos de membrana son sistemas confiables y robustos, capaces de soportar el aumento en la concentración de arsénico en el agua, sin menoscabo apreciable de la calidad del agua tratada. Con el objeto de verificar la viabilidad técnica y económica de los procesos de membrana para remover arsénico del agua, se llevaron a cabo pruebas de tratabilidad con unidades piloto de microfiltración y de nanofiltración en un pozo, cuya concentración promedio de arsénico fue de 67 $\mu\text{g/L}$ y conductividad promedio de 975 $\mu\text{S/cm}$.

Hipótesis: la coagulación acoplada con microfiltración (C-MF) y la nanofiltración (NF) son procesos factibles técnica y económicamente, para producir agua potable a partir de fuentes contaminadas con arsénico.

Marco teórico

Una membrana es una barrera semipermeable, a través de la cual el agua pasa relativamente rápido, mientras que otras sustancias no pueden traspasarla o lo hacen a una velocidad menor. La carga eléctrica, el peso molecular y el radio molecular son características fisicoquímicas de los solutos (o partículas) que, en interacción con la carga superficial, la hidrofobicidad y el tamaño de poro de las membranas, determinarán si la sustancia (o partícula) en la solución acuosa es susceptible de traspasar la membrana. El movimiento del agua y de las especies a través de la membrana requiere una fuerza directriz: un gradiente de presión para las membranas comprendidas en este estudio. Las características principales de este grupo de membranas se indican en el cuadro 1.

La microfiltración (MF) y la ultrafiltración (UF) son procesos que operan a baja presión (~ 0.5 a 5 bar). Los poros de las membranas en este tipo de procesos son relativamente abiertos (de 0.005 a 5 μm), por lo que el principio de separación de las partículas es un tamizaje. Por su parte, las membranas de nanofiltración (NF) trabajan a presiones intermedias (5-40 bar) con un doble principio de separación: un rechazo estérico, en función del tamaño y forma de los poros de la membrana y de los solutos a eliminar del agua, y un rechazo electrostático, ocasionado por la carga negativa de la superficie de las membranas a un pH neutro del agua (Aptel y Buckley, 1996).

Cuadro 1. Características generales de las membranas según el proceso de filtración.

Operación	Tamaño de poro (nm)	Peso molecular de corte (Da)	Presión (bar)	Sustancias en el permeado
Microfiltración (MF)	50 - 5 000	> 500 000	0.5 - 2	Agua y coloides
Ultrafiltración (UF)	5 - 50	2 000 - 500 000	0.5 - 5	Agua y macromoléculas
Nanofiltración (NF)	0.6 - 5	200 - 2 000	5 - 40	Agua y solutos de bajo peso molecular
Ósmosis inversa (OI)	< 0.6	< 200	30 - 70	Agua

Adaptado de Thorsen y Fløgstad, 2006.

El tamaño de los poros en las membranas de NF y ósmosis inversa (OI) dificulta su aplicación cuando hay partículas cuyo diámetro es mayor que 5 μm ; idealmente debe ser menor que 0.1 μm . Por otra parte, el aumento progresivo en la concentración de la salmuera de iones metálicos polivalentes y de sílice puede dar lugar a precipitaciones sobre la superficie de la membrana; asimismo, compuestos de hierro y manganeso, y compuestos orgánicos pueden ensuciar la membrana. La formación de depósitos minerales u orgánicos sobre la superficie de la membrana puede ocasionar un taponamiento irreversible de la misma y debe ser evitado por medio de un pre-tratamiento adecuado que incluya la remoción de partículas en suspensión, la adición de químicos anti-incrustantes y/o ácido en el agua, y el control para evitar la formación de películas biológicas. Otro factor importante es la recuperación del agua tratada: ¿qué proporción se obtiene como producto final y cuánta se desecha como salmuera o lodo? Los procesos de MF y UF pueden alcanzar tasas de recuperación de hasta 95%, mientras los de NF y OI pueden ser de hasta 85%, cuando las propiedades incrustantes del agua son muy bajas.

Remoción de arsénico mediante coagulación-microfiltración

Debido al tamaño de poro (de 0.05 a 5 μm) de las membranas de microfiltración, la remoción de arsénico disuelto sólo por tamizaje es muy escaso o nulo. Nguyen y su equipo (2009) observaron en pruebas con una membrana comercial de 0.4 μm , que hubo una remoción de 40% de As (V), aproximadamente. Sin embargo, esos niveles de remoción no son suficientes para garantizar que se producirá agua potable a partir de fuentes contaminadas con arsénico, especialmente si la concentración del metaloide es superior a 50 $\mu\text{g/l}$.

Para dar viabilidad a la MF en la remoción de arsénico disuelto en el agua, el proceso se combina con la coagulación química (USEPA, 2000; Chwirka *et al.*, 2004; Ghurye *et al.*, 2004),

de tal forma que el arsénico se adsorba en la superficie o quede atrapado en el interior de los hidróxidos de hierro o de aluminio que se forman cuando se añaden iones trivalentes de estos elementos al agua. Las partículas formadas deben alcanzar un tamaño tal que no traspasen las membranas de MF.

Han *et al.* (2002) compararon dos trenes de tratamiento: coagulación + sedimentación y coagulación + MF. Con una concentración inicial de As total de 60 $\mu\text{g/l}$, el primer tren de tratamiento alcanzó una concentración en el agua tratada de 32 $\mu\text{g/l}$ ($\approx$ 47% de remoción); la coagulación combinada con MF logró una remoción de 98%, por lo que la combinación de coagulación con membranas resulta más eficiente que el proceso convencional.

Ghurye y su equipo (2004) concluyeron que, dado el tamaño de partícula que se forma en la coagulación con sales férricas, se requiere una membrana con un tamaño de poro menor o igual a 0.2 μm para la remoción eficiente de precipitados de hidróxido de hierro cargados de arsénico. En 2007, el mismo investigador y su equipo efectuaron un estudio comparativo de diversas tecnologías de remoción de arsénico en aguas industriales para entregar efluentes con concentraciones iguales o menores que 4 μg (As)/l. A su juicio, la C-MF es una de las tecnologías más rentables, ya que es capaz de satisfacer ese requisito a partir de aguas con altas concentraciones de arsénico y utilizando dosis bajas de sales férricas. Otra forma de acrecentar la eficiencia de la microfiltración en la eliminación de arsénico es combinar la adsorción sobre nanopartículas (de 10 a 100 nm) de hierro de valencia 0 (Nguyen *et al.* 2009) con la microfiltración.

Al menos dos fabricantes de sistemas con membranas de MF aseguran, en sus folletos promocionales, que sus equipos son eficaces para la remoción de arsénico del agua si son anteceditos por un pre-tratamiento químico (coagulación). Otra ventaja, que aseguran está asociada con los sistemas de MF, es la optimización de espacio, ya que la floculación y la sedimentación pueden ser eliminadas, lo

que se traduce en instalaciones muy compactas y que requieren menos obra civil que los procesos convencionales (Pall Corporation, 2005; Siemens Water Technologies, 2007).

Remoción de arsénico mediante la nanofiltración (NF)

Se han llevado a cabo diversos estudios para la remoción de As por medio de membranas de NF y los resultados han mostrado su efectividad; el proceso se ve afectado por parámetros de operación, propiedades de la membrana y la especiación del arsénico.

La AWWARF (2000) llevó a cabo estudios piloto con soluciones preparadas de As y con agua de un lago. Se probaron módulos de membranas comerciales y de membranas planas; las membranas poseían una carga negativa superficial. Los resultados se muestran en el cuadro 2. La remoción de arsénico (III) fue de 12%; en contraste, las eficiencias de remoción de As (V) fueron mayores o iguales que 85%.

Otros estudios (Akbari et al., 2010; Oh et al., 2000; Sato et al., 2002; Uddin et al., 2007; Xia et al., 2007) en los que se utilizaron membranas comerciales de NF han dejado ver que el As (V), al poseer una carga negativa cuando el pH del agua es neutro, es rechazado por la superficie de las membranas en una proporción mayor que el As (III), que se encuentra eléctricamente neutro en esas mismas condiciones, por lo que atraviesa la membrana con facilidad. Sin embargo, se ha informado que la remoción

de As (III) es de hasta 60% a pH 7 (Kim et al., 2006).

Aun si la especie predominante de arsénico en el agua es arsenito (As III), es posible cambiar el estado de oxidación al estado más favorable para el proceso (As V) mediante procedimientos sencillos, como la oxidación con cloro y remoción del oxidante excedente (ya que las membranas hechas de poliamida son afectadas por el cloro), o bien mediante la filtración en dióxido de manganeso (Moore et al., 2008).

En la medida en que el pH del agua se desplaza hacia la región alcalina, la superficie de las membranas de NF tiende a ser más negativa, lo que aumenta la capacidad por rechazo electrostático. También, cuando el pH es mayor que 7, el ión de arsénico V que predomina es divalente (HAsO_4^{2-}), mientras que por debajo de siete predomina en su forma monovalente (H_2AsO_4^-). En estas condiciones, la exclusión por carga electrostática tiene una fuerte influencia en el rechazo del arsénico (Figoli et al., 2010). Por lo anterior, es válido suponer que la NF removerá con alta eficiencia el arsénico presente en aguas con pH neutro a alcalino y con presencia de arsénico pentavalente.

Material y métodos

Las pruebas de tratabilidad con NF y C-MF se llevaron a cabo en un pozo profundo que produce 15 l/s de agua con una concentración

Cuadro 2. Eficiencias de remoción para arsénico en aguas sintéticas y superficiales.

Tipo de membrana ¹	Tipo de agua	Estado de oxidación del arsénico	pH	Eficiencia de remoción As (%)
Enrollada en espiral				
NF 45-2540	Desionizada	V	6.7	85
NF 45-2540	Lago	V	6.9	89
NF 45-2540	Desionizada	III	6.9	12
Membrana plana				
NF 45-2540	Desionizada	V	NA	90

¹Peso molecular de corte = 300 Da, carga superficial negativa.
Adaptada de AWWARF, 2000.

promedio de arsénico de 0.67 mg/l que abastece a unos 1 200 hogares de clase media. Las características del agua tratada se muestran en el cuadro 3. Para las pruebas de NF se analizaron las concentraciones de los iones Ba^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} , $\text{SO}_4^{=}$, y HCO_3^- , así como el sílice (SiO_2), debido a su capacidad de incrustación sobre las membranas. Una vez caracterizada el agua, se calculó, utilizando el *software* de uso gratuito *Avista Advisor 3.0*, el potencial de incrustación del agua, la recuperación máxima posible que no comprometiera la vida útil de la membrana y la cantidad de antiincrustante requerida para alcanzar dicha recuperación. En el caso de la coagulación-MF, se verificó que el agua tuviera una capacidad amortiguadora suficiente para que al agregar el cloruro férrico no se saliera del intervalo de pH en que ocurre la coagulación.

Coagulación-microfiltración

El tren de tratamiento de la MF asistida por coagulación en línea incluye la adición de cloro y de coagulante. Una vez añadidos los químicos, se lleva a cabo una mezcla en línea, y el agua se recibe en el tanque de regulación y alimentación al banco de membranas. El equipo utilizado fue un Sistema Pall Aria A-X2 con dos módulos de MF, con lo que la capacidad de tratamiento es de hasta 2 l/s. El intervalo de presión de operación es de 0.7 a 3.1 bar. El piloto es semiautomático y cuenta con un Controlador Lógico Programable (PLC), que regula la operación normal de producción de agua, así como los ciclos de limpieza y pruebas de integridad de las membranas.

Las membranas del piloto son de fibra hueca de polivinilideno fluoruro (PVDF), con un tamaño nominal de poro de 0.1 μm ; las

Cuadro 3. Caracterización del agua del pozo.

Parámetro	Unidades	Pozo 32R	NOM-127-SSA1-1994
pH		7.72	6.5 - 8.5
Temperatura	°C	27.6	N.I.
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$	1 157	N.I.
As	mg/l	0.067	0.025
Ba	mg/l	0.039	0.70
Ca	mg/l	99.59	*
Fe	mg/l	0.03	0.30
Mg	mg/l	8.19	*
Mn	mg/l	-	0.15
Na	mg/l	131.20	200.0
Sr	mg/l	1.59	N.I.
Alcalinidad	mg/l CaCO_3	130	N.I.
B	mg/l	0.21	N.I.
Cl^-	mg/l	55	250.0
F^-	mg/l	0.91	1.50
$(\text{NO}_3)^-$	mg/l	3.89	10.0
$(\text{SO}_4)^{=}$	mg/l	357.00	400.0
$\text{SiO}_2^{(1)}$	mg/l	82.00	N.I.

⁽¹⁾ Valor calculado a partir de la concentración de silicio.

N.I. = no incluido en la norma.

* Dureza total es el parámetro normado, no especifica los iones calcio y magnesio.

fibras huecas tienen un diámetro interno/externo de 1.33/0.7 mm. El área efectiva de cada módulo es de 50 m². La filtración se realiza del exterior al interior de las membranas, por lo que las partículas son retenidas en la superficie externa.

El caudal de alimentación se estableció en 5.2 m³/h; el ciclo de limpieza se programó para activarse cada vez que filtrara dos mil litros de agua o cada treinta minutos, lo que ocurriera primero. El flujo específico promedio (flux o tasa de filtración) fue de 45 l/m²h, que representa un valor conservador, pero en el intervalo adecuado para este tipo de agua.

El sistema opera por lotes regulados por el PLC. La dosis de cloro (a partir de una solución de NaClO) fue de 1.5 mg/l y la de cloruro férrico fue de 6 mg/l, aproximadamente. El

periodo de pruebas fue de cinco días. La figura 1 muestra la instalación en campo del piloto de MF asistida por coagulación en línea. La corriente de rechazo se dejó sedimentar y se concentró para evaluar, mediante la prueba CRIT, si se trata de un residuo peligroso.

Nanofiltración

El agua del pozo se recibe en el tanque de alimentación de 2.5 m³ de capacidad. Mediante una bomba centrífuga se le da carga para vencer la resistencia de los filtros cartucho (diámetro nominal de 10 µm) y para activar la bomba de alta presión (de hasta 9 kg/cm²). El antiincrustante se agrega en línea; el punto de inyección se localiza aguas arriba de los filtros cartucho.



Figura 1. Instalación del piloto de microfiltración asistida por coagulación.

El banco de NF consta de seis vasijas de presión, cada una para tres membranas de 10.16×101.6 cm (4" x 40"). En la primera etapa hay cuatro vasijas y dos en la segunda. Las membranas utilizadas fueron ESNA1-LF-4040 de Hydranautics, con un rechazo nominal de 89% de NaCl. La figura 2 muestra al piloto de NF instalado en campo. El equipo se ajustó para producir $3.6 \text{ m}^3/\text{h}$, con una eficiencia de recuperación de 58%; el caudal de alimentación fue de $6.2 \text{ m}^3/\text{h}$. El flujo específico promedio fue de $25.1 \text{ l/m}^2\text{h}$, mismo que los fabricantes de membranas consideran adecuado para el tipo de agua a tratar. La operación fue continua (24 horas al día). Hubo algunos paros por fallas en la corriente eléctrica por disminución de la presión de alimentación por saturación de los cartuchos filtrantes y por limpieza de las membranas.

Dadas las concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- y SiO_2 , fue necesario agregar un antiincrustante comercial (Vitec 4000 de Avistatech); la dosis calculada y aplicada fue de 2.7 mg/l . La temperatura del agua variaba a lo largo del día entre los 26 y 32.6°C .

Resultados

Calidad del agua producida mediante coagulación-MF

El agua del pozo presentó una concentración promedio de arsénico de $72.58 \text{ }\mu\text{g/l}$, oscilando entre 56 y $82 \text{ }\mu\text{g/l}$. La concentración de arsénico en el agua tratada fue menor a $25 \text{ }\mu\text{g/l}$ en todos los casos; en el 55% de las muestras, la concentración fue inferior a $10 \text{ }\mu\text{g/l}$. En



Figura 2. Piloto de nanofiltración.

la figura 3 se muestran las concentraciones de arsénico tanto en el agua cruda como en la tratada, y en la figura 4 se muestran las eficiencias de remoción de arsénico y hierro comparadas con la concentración de hierro y cloro en la muestra. No se puede explicar el comportamiento a partir de las dosis de cloro y hierro, ya que la menor eficiencia de remoción (73.8%) se alcanzó en condiciones semejantes a las de la máxima eficiencia de remoción ($\approx 100\%$).

Al quinto día de pruebas, la concentración de arsénico en el agua tratada fue prácticamente no detectable en seis muestras y sólo en una muestra igual a $5 \mu\text{g/l}$; las eficiencias de remoción fueron mayores que 92% . Esto es consistente con lo propuesto por Ghurye *et al.* (2007) acerca de alcanzar concentraciones menores que $4 \mu\text{g/l}$ en el agua tratada mediante C-MF (2007). El pH del agua tratada prácticamente no se modifica y la concentración de hierro fue siempre inferior a 0.3 mg/l , aun cuando se agregó la mayor cantidad de hierro disuelto (3.3 mg/l).

Si bien la duración de la prueba fue muy corta (cinco días) como para establecer un patrón de ensuciamiento irreversible de las membranas, la caída de presión se mantuvo en 0.14 bar (2 psi), por lo que es probable que un ciclo de limpieza química al mes sea suficiente para recuperar el flux del sistema.

Calidad del agua producida mediante NF

El agua del pozo presentó una concentración promedio de arsénico de $80.1 \pm 11.2 \mu\text{g/l}$, oscilando entre 42 y $94 \mu\text{g/l}$. Para el agua tratada, prácticamente todas las muestras presentaron concentraciones inferiores a $10 \mu\text{g/l}$, con excepción de la muestra del día 2 de julio, en que se registró una concentración de $11 \mu\text{g/l}$.

En la figura 5 se muestra el comportamiento del proceso de remoción de arsénico. Las lecturas de la concentración de arsénico del agua tratada son comparadas con la norma de agua potable en México, la modificación de la

NOM-127-SSA1-1994 (2000) y con el valor guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS). El agua producto satisface las condiciones tanto de la norma mexicana como de la guía de la OMS.

La NF resulta un proceso efectivo para el control del arsénico en la región, ya que en promedio alcanza una eficiencia de remoción de 95.4% , que es una eficiencia semejante a la informada por otros autores (Akbari *et al.*, 2010): de 95.68 a 99.02% , variando la presión; (Figoli *et al.*, 2010), 95.4% a 15°C con membranas de un rechazo nominal semejante (90% de NaCl).

El proceso mostró gran eficiencia de remoción de otras sustancias disueltas (datos no mostrados en el estudio); la conductividad se redujo en promedio en $86\% \pm 3\%$ ($C_0 = 976 \mu\text{S/cm} \pm 41$; $C_p = 135 \mu\text{S/cm} \pm 34$), la dureza disminuyó en $94\% \pm 4\%$ ($C_0 = 226 \mu\text{S/cm} \pm 35$; $C_p = 15 \mu\text{S/cm} \pm 9$) y la alcalinidad se redujo en $76\% \pm 13\%$ ($C_0 = 111 \mu\text{S/cm} \pm 44$; $C_p = 32 \mu\text{S/cm} \pm 20$).

Dada la baja concentración de sólidos disueltos totales en el agua producida, se verificó, mediante el índice de saturación de Langelier (ISL), su estabilidad química, con lo que se obtuvo un índice de -0.68 , que la ubica como agua ligeramente corrosiva. Si se agregan 4 mg/l de cal (Ca(OH)_2) y 3 mg/l de carbonato de sodio (Na_2CO_3), se logra un $\text{ILS} = 0$. La zona ideal para el agua potable es de 0 a 0.5 .

Consumo de energía

Como parte de la evaluación se midió la energía consumida durante el proceso utilizando multímetros digitales DMK 30 de LOVATO. El consumo energético de ambos procesos fue graficado en función del volumen de agua producido. La pendiente de la curva representa la cantidad de energía consumida para producir un metro cúbico de agua tratada. En el caso de la MF, los equipos conectados a la línea principal de energía fueron la bomba de alimentación (potencia nominal de 3 HP y con variador de frecuencia), las bombas

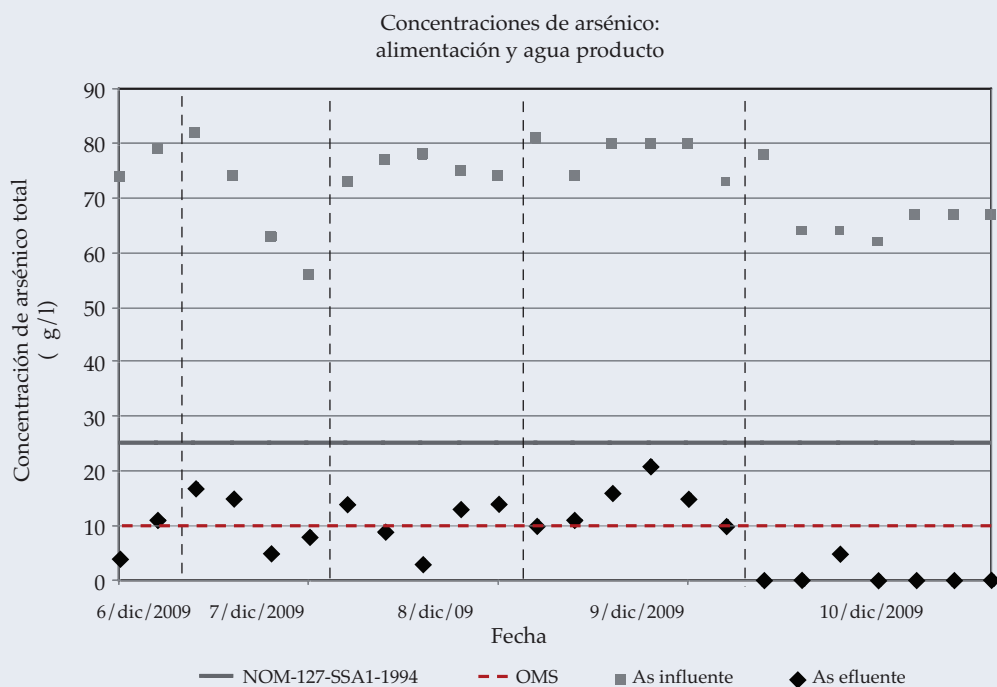


Figura 3. Contenido de arsénico en el agua cruda y tratada mediante microfiltración asistida por coagulación en línea.

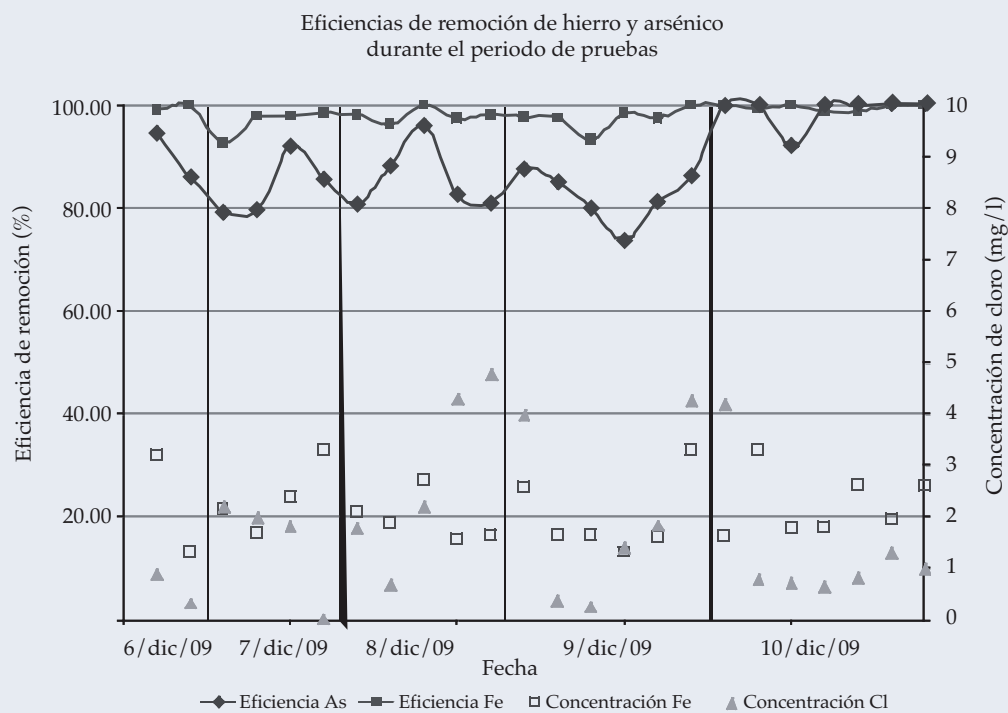


Figura 4. Eficiencia de remoción de arsénico y hierro.

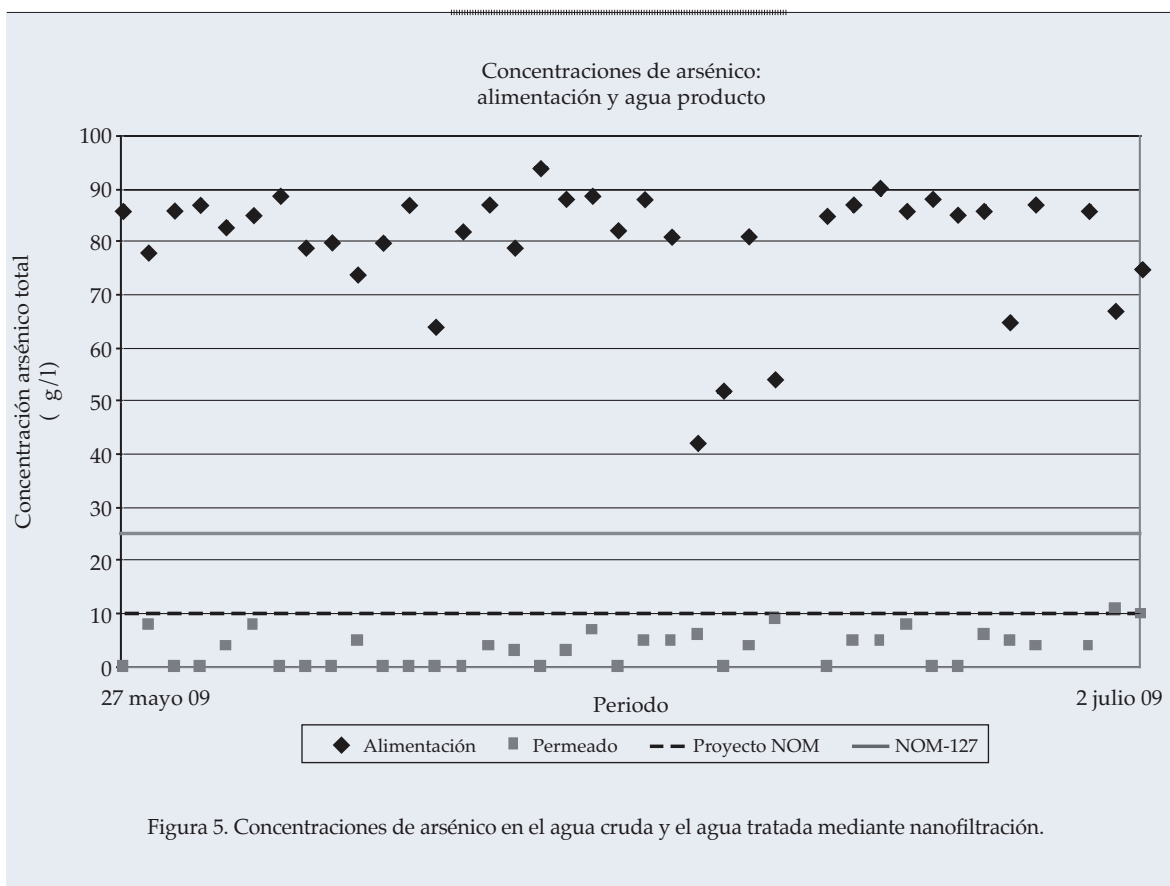


Figura 5. Concentraciones de arsénico en el agua cruda y el agua tratada mediante nanofiltración.

dosificadoras (potencia nominal de 0.125 HP cada una), el compresor de aire (potencia nominal de 2HP) y el tablero de control del proceso. La bomba de transferencia (potencia nominal de 1/2 HP) estaba conectada a otra fuente de energía (corriente trifásica de 440 V) y el consumo de esta última no fue medido, sino calculado. La energía específica totalizada para este proceso fue de 0.198 kWh/m³ de agua tratada.

En el caso de la NF, la energía específica fue de 0.687 kWh/m³. Cabe aclarar que en este piloto el motor está sobredimensionado, ya que de acuerdo con el diseño del proceso, un motor de 1.5 HP sería suficiente para alcanzar las condiciones de caudal y presión requeridas para su buen funcionamiento; sin embargo, comercialmente no se encontró una bomba que pudiera proporcionar el caudal y la presión de alimentación utilizando un motor menor que 5 HP. La figura 6 muestra el comportamiento

de la energía en ambos procesos, es evidente que el consumo energético de la nanofiltración es sustancialmente mayor que el de la microfiltración.

Generación de desechos

Con el fin de verificar si los lodos generados por la coagulación-MF presentan la condición de residuo peligroso, fue necesario determinar si eran corrosivos, reactivos, inflamables o tóxicos ambientales (análisis CRIT), descrito en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005. Dado que los lodos de desecho son muy diluidos, fueron concentrados mediante un procedimiento repetitivo de sedimentación y separación del sobrenadante. Los resultados del laboratorio (no mostrados en el estudio) indican que se trata de un residuo no peligroso, ya que no es corrosivo, reactivo, inflamable ni tóxico al ambiente; la

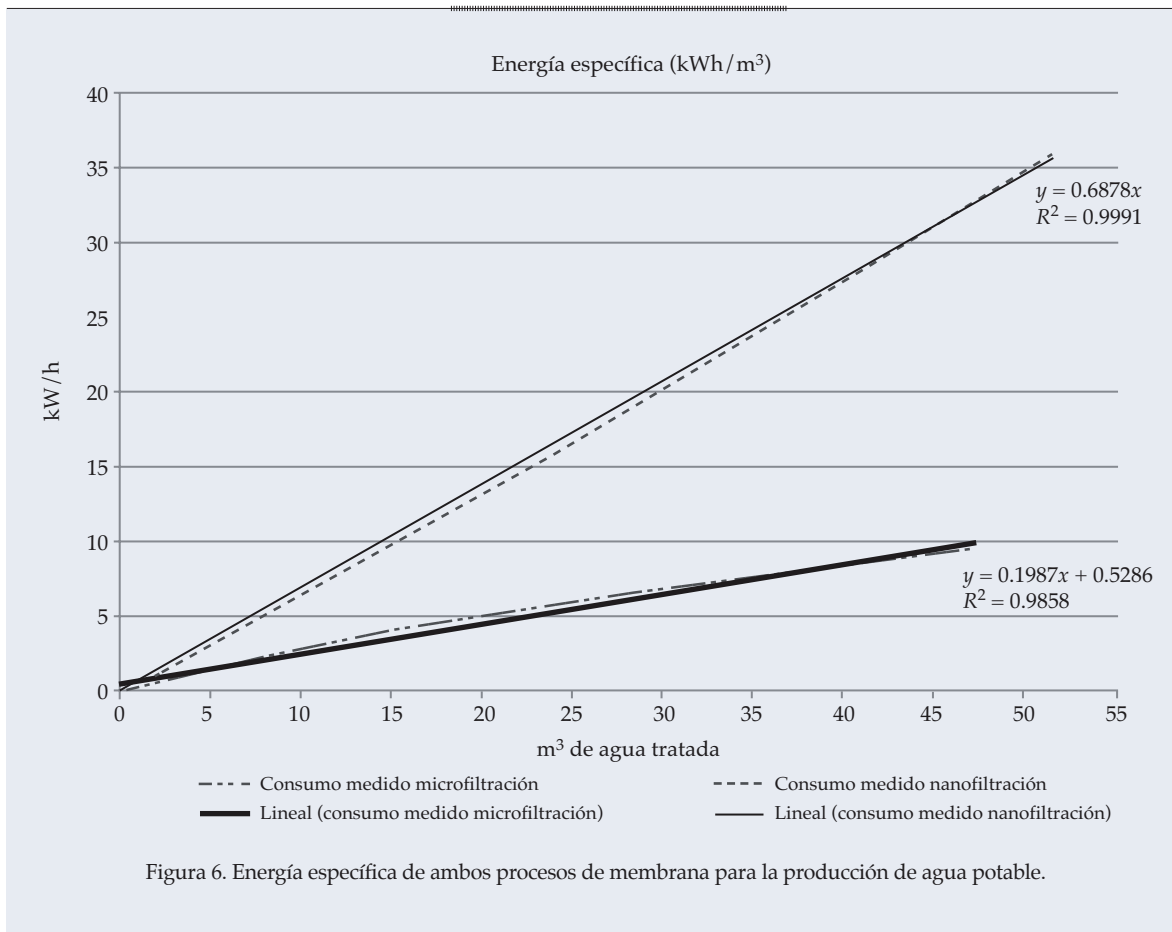


Figura 6. Energía específica de ambos procesos de membrana para la producción de agua potable.

concentración de metales lixiviables obtenida mediante el Procedimiento de Extracción de Constituyentes Tóxicos (PECT) fue menor que los límites máximos permisibles.

Dado que todos los lodos producidos fueron utilizados para el análisis CRIT, la producción de lodos se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$S = 0.086344 * Q * (2.9 * Fe + SS + A)$$

(adaptado de AWWA, 2002)

Donde:

S = lodo producido (kg/día).
 Q = caudal de la planta (l/s).
 Fe = dosis de hierro (Fe^{+3} en mg/l).
 SS = sólidos en suspensión en el agua cruda (mg/l) $\approx$ turbiedad medida en campo (AWWA, 2002).

A = otros aditivos añadidos, como polímero, arcilla o carbón activado en polvo (mg/l = 0.0).

$Q = 1.44$ l/s

$Fe = 2.41$ mg/l

$SS = 7$ mg/l

$$\begin{aligned}
 S &= 0.086344 * 1.44 * (2.9 * 2.41 + 7 + 0.0) \\
 &= 1.7486 \text{ kg/d}
 \end{aligned}$$

La NF generó la salmuera de desecho a una tasa de 2.6 m³/h, con una concentración de arsénico de 0.151 mg/l. Por lo tanto, no excede los límites de la NOM-002-SEMARNAT-1996 (0.5 mg/l) y puede ser descargada en el alcantarillado urbano.

Comparación de costos

Para hacer la comparación económica de ambos procesos se tomaron los valores de

consumo de energía eléctrica medidos en campo, consumo de reactivos y los desechos generados. Con base en ellos se hizo una proyección para una planta que trate 30 l/s de agua. En el cuadro 4 se resumen los conceptos considerados para establecer el costo de operación.

En el caso de la MF, se incluyó el uso de hidróxido de sodio y ácido sulfúrico para la limpieza química de las membranas. Si bien durante las pruebas no fue necesario hacerlo por la duración de la prueba, en otras instalaciones semejantes es práctica común el aplicar el proceso de limpieza química una vez al mes. También se calculó la cantidad de lodos que se generarían anualmente y el consumo de polímero para su acondicionamiento y disposición final en un relleno sanitario de la región. Asimismo, se consideró que una planta formal de MF asistida por coagulación debe incluir un tanque adicional para separación de lodos, la bomba para el retorno del sobrenadante

al proceso, un espesador de lodos, y un filtro prensa o un filtro banda para el desaguado de los lodos. Con este esquema se calcula que la energía específica aumentaría hasta 0.4 kWh/m³.

Para la NF se consideró que se requiere de una batería de filtros de arena como pre-tratamiento y que el nivel de recuperación del agua puede alcanzar hasta 79%, por el potencial de incrustación del agua. Bajo este esquema, el agua tratada producida es de 23.7 l/s y la salmuera generada alcanza una concentración de arsénico de 0.303 mg/l, que sigue en cumplimiento con la NOM-002-SEMARNAT-1996. Asimismo, se calculó el consumo energético que tendría la planta de NF, incluyendo los filtros de arena y los equipos de bombeo de alta presión optimizados. El resultado fue 0.7 kWh/m³, prácticamente igual a la medición en campo.

Para ambos procesos se consideró una vida útil de las membranas de cinco años, sus-

Cuadro 4. Insumos y reactivos requeridos para la operación anual de las tecnologías comparadas.

Concepto	Precio unitario (\$)	Microfiltración		Nanofiltración	
		(consumo anual)	(\$/año)	(consumo anual)	(\$/año)
Volumen producido (m ³)	-	927 158	-	737 165	-
Antiincrustante (kg)	284.74	-	-	2 519.42	717 389.75
H ₂ SO ₄ (kg)	4.60	9 460.80	42 923.52	-	-
NaOH (kg)	13.34	5 676.48	74 686.92	-	-
Reactivos limpieza NF (kg)	268.18	-	-	759.04	203 559.58
Cal mineralización NF (kg)	3.90	-	-	2 948.66	11 499.77
Carbonato de sodio NF (kg)	11.70	-	-	2 211.49	25 874.48
Membranas MF	27 600.00	5	138 000.00	-	-
Membranas NF	11 040.00	-	-	19.2	211 968.00
Filtros cartucho	192.00	-	-	768	147 456.00
Consumo de energía eléctrica (kWh)	1.34	370 863.36	497 265.96	516 015.36	691 890.60
FeCl ₃ (kg)	6.19	16 556.40	102 484.12	-	-
Hipoclorito de sodio (kg)	3.99	7 277.54	29 037.38	-	-
Polímero (lodos) (kg)	73.14	207.36	15 166.31	-	-
Lodos generados (ton)	115.00	62.87	7 230.25	-	-
Contenedor de lodos de 3 m ³ (unidad)	3 240.00	2	6 480.00	-	-
Total \$	-	-	913 274.46	-	2 009 638.18
\$/m ³ de agua producida	-	-	0.99	-	2.73

tituyendo una quinta parte de las membranas por año, en vez de cambiar todo el lote después de cinco años. Asimismo, las plantas fueron proyectadas conservando el flujo específico promedio de los pilotos: 45 l/m²h para MF y 25.1 l/m²h para NF.

Con tales consideraciones, el costo de operación de la MF es de \$0.99/m³ de agua tratada, mientras que la NF es \$2.73. Estos costos no incluyen la mano de obra (aproximadamente \$0.14/m³ en ambos casos) ni la inversión por la construcción de la planta. Dado el tamaño de instalaciones que se consideró para la evaluación económica (30 l/s), los costos de inversión serían de \$8.00 millones para la construcción de la planta de MF y \$5.7 millones para la planta de NF.

Discusión

Ambas tecnologías son capaces de remover arsénico del agua con altas eficiencias, lo que permite su aplicación para el agua problema e incluso para fuentes que presenten mayor concentración de arsénico. La diferencia de costos totales de operación para este estudio comparativo fue de \$1.74/m³. Hay tres factores fundamentales para ello. El primero es el diferencial en productividad (recuperación); mientras que para la C-MF es de 95%, para la NF es de 79%. El segundo es el diferencial en el consumo de energía eléctrica, 0.3 kWh/m³; la NF demanda más energía para su funcionamiento. El tercer factor es el costo de los reactivos químicos; en general, la NF requiere químicos especializados, de importación, tanto para la limpieza de las membranas como para evitar la incrustación por sílice y costosos; de hecho, representan el 45.8% del costo de operación de la NF. Los reactivos asociados con la C-MF son de menor costo y en general las dosis son bajas.

Por otra parte, la C-MF es altamente específica para la remoción de arsénico: sólo remueve el metaloide. La NF es de un espectro mucho más amplio, ya que además del arsénico (V, especialmente), remueve otros

iones presentes en el agua, tales como sulfatos, fluoruros, cloruros, bicarbonatos y, en general, todos los metales divalentes y, en menor medida, los monovalentes. Sin embargo, si estos iones no comprometen la calidad del agua a tratar, su remoción no se justifica y por lo tanto tampoco el diferencial de costo. Si el único contaminante que altera la calidad del agua es el arsénico en concentraciones entre 70 y 80 µg/l, la alternativa más viable es C-MF. En la medida en que otros iones se encuentren presentes en el agua a tratar en concentraciones tales que comprometan su calidad, se justifica la aplicación de la NF.

Conclusiones

Los procesos de coagulación-microfiltración y nanofiltración son eficaces para remover el arsénico del agua en el pozo analizado. La MF asistida por coagulación en línea tiene la capacidad de tratar agua con arsénico disuelto y producir un efluente que satisfaga la normatividad vigente. Los residuos generados por el proceso de coagulación-microfiltración son inocuos y pueden ser dispuestos en un relleno sanitario.

La nanofiltración remueve el arsénico del agua con una alta eficiencia y además remueve otros iones presentes en el agua, tales como sulfatos, nitratos, bicarbonatos, calcio y magnesio, por lo que es capaz de producir agua de excelente calidad. La concentración de arsénico en la salmuera producida por la nanofiltración no es considerada como un residuo peligroso (< 0.5 mg/l), por lo que puede ser vertida directamente al alcantarillado.

De los dos procesos analizados para tratar el agua del pozo del estudio, la coagulación-microfiltración es la más económica y por lo mismo es la que resulta más factible para tratar el agua del pozo analizado. La nanofiltración se recomienda para pozos en los que, además de arsénico, estén presentes otros iones, tales como sulfatos, cloruros o fluoruros, en concentraciones tales que comprometan la calidad del agua.

Recibido: 09/12/10
Aprobado: 23/10/11

Referencias

- AKBARI, H.R., RASHIDI-MEHRABADI, A., and TORABIAN, A. Determination of nanofiltration efficiency in arsenic removal from drinking water. *Iran Journal of Environmental Health Science and Engineering*. Vol. 7, No. 3, 2010, pp. 273-278.
- APTEL, P. and BUCKLEY, C.A. Categories of Membrane Operations. Chapter in *Water Treatment Membrane Processes*. New York: McGraw Hill, 1996, 22 pp.
- AWWA. *Water Quality and Treatment*. Chapter 16 Water treatment plant residuals management. Raymond Letterman Technical Editor. New York: McGraw Hill-American Water Works Association, 2002, pp. 16.4.
- AWWARE. *Arsenic Treatability Options and Evaluation of Residuals Management Issues*. Amy, G.L., Edwards, M., Benjamin, M., Carlson, K., Chwirka, J., Brandhuber, P., McNeill, L., and Vagliasindi, F. Denver: American Water Works Association Research Foundation, 2000, pp. 260.
- FIGOLI, A., CASSANO, A., CRISCUOLI, A., MOZUMDER, M.S.I., UDDIN, M.T., ISLAM, M.A., and DRIOLI, E. Influence of operating parameters on the arsenic removal by nanofiltration. *Water Research*. Vol. 44, 2010, pp. 97-104.
- GHURYE, G., CLIFFORD, D., and TRIPP, A. Iron coagulation and direct microfiltration to remove arsenic from groundwater. *Journal AWWA*. Vol. 96, No. 4, 2004, pp. 143-152.
- GHURYE, G., YOUNAN, J.C., and CHWIRKA, J. Arsenic removal from industrial wastewater discharges and residuals management issues. *Journal of EUPEC*. Volume 1, 2007, pp. 1-22.
- HAN, B., RUNNELLS, T., ZIMBRON, J., and WICK-RAMASINGHE, R. Arsenic removal from drinking water by flocculation and microfiltration. *Desalination*. Vol. 145, Issues 1-3, 2002, pp. 293-298.
- IARC. International Agency for Research for Cancer. Arsenic in drinking water. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. Vol. 84, 2004, pp. 41-229.
- IRIS. *Arsenic, inorganic (CASRN 7440-38-2)* [en línea]. U.S. Environmental Protection Agency. Integrated Risk Information System, USA, 2007. Disponible en *World Wide Web*: <http://www.epa.gov/iris/subst/0278.htm>.
- KIM, H.D., KIM, W.K., and CHO, J. Removal and transport mechanisms of arsenics in UF and NF membrane processes. *Journal of Water and Health*. Vol. 4, No. 2, 2006, pp. 215-223.
- MOORE, K., HUCK, P., and SIVERNS, S. Arsenic removal using oxidative media and nanofiltration. *Journal AWWA*. Vol. 100, No. 12, 2008, pp. 74-83.
- NGUYEN, V.T., VIGNESWARAN, S., NGO, H.H., SHON, H.K., and KANDASAMY, J. Arsenic removal by a membrane hybrid filtration system. *Desalination*. Vol. 236, 2009, pp. 363-369.
- NOM-002-SEMARNAT-1996 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. *Diario Oficial de la Federación*, 3 de junio de 1998.
- MODIFICACIÓN A LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994 SALUD AMBIENTAL. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario Oficial de la Federación*, 20 de junio de 2000.
- NRC. *Arsenic in drinking water*. Washington, D.C: National Academy Press-National Research Council, 1999.
- OH, J.I., URASE, T., KITAWAKI, H., RAHMAN, M.M., RAHMAN, M.H., and YAMAMOTO, K. Modeling of arsenic rejection considering affinity and steric hindrance effect in nanofiltration membranes. *Water Science and Technology*. Volume 42, 2000, pp. 173-180.
- PALL CORPORATION. *Pall Filtration Technology Verified to Remove Arsenic from Drinking Water* [en línea], 2005. Disponible en *World Wide Web*: http://www.pall.com/water_52604.asp.
- SATO, Y., KANG, M., KARNEI, T., and MAGARA, Y. Performance of Nanofiltration for Arsenic Removal. *Water Research*. Vol. 36, 2002, pp. 3371-3377.
- SIEMENS WATER TECHNOLOGIES. *Filtración avanzada por membranas* [en línea], 2007. Disponible en *World Wide Web*: http://www.water.siemens.com/SiteCollectionDocuments/Product_Lines/Industrial_Wastewater_Systems/Brochures/EPWP-EFCsp-IUE-BR-1107.pdf.
- THORSEN, T. and FLØGSTAD, H. Nanofiltration in drinking water treatment. *Techneau* [en línea], 2006. Disponible en *World Wide Web*: <http://www.techneau.org/fileadmin/files/Publications/Publications/Deliverables/D5.3.4b.pdf>.
- UDDIN, T., MOZUMDER, S.I., FIGOLI, A., ISLAM, A., and DRIOLI, E. Arsenic removal by conventional and membrane technology: an overview. *Indian Journal of Chemical Technology*. Vol. 14, 2007, pp. 441-450.
- WHO. World Health Organization. *United Nations synthesis report on arsenic in drinking water*. Geneva: United Nations Administrative Committee on Cooperation Subcommittee on Water Resources, with active participation of UNICEF, UNIDO, IAEA and the World Bank, 2004.
- XIA, S., DONG, B., ZHANG, Q., XU, B., GAO, N., and CAUSSERANDA, C. Study of arsenic removal by nanofiltration and its application in China. *Desalination*. Vol. 204, 2007, pp. 374-379.

Abstract

CALDERÓN-MÓLGORA, C., QUEZADA-JIMÉNEZ, M.L., SEGURA-BELTRÁN, N. & HERNÁNDEZ-YAÑEZ, C. Arsenic removal using membrane processes. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. III, Special Number TyCA-RETAC, February-March, 2012, pp. 37-51.

To verify the technical and economic viability of purifying water contaminated with arsenic using membrane processes, water treatment tests were carried out with pilot coagulation/microfiltration (C/MF) and nanofiltration (NF) units in a well with an average arsenic concentration of 67 µg/l and an average conductivity of 975 µS/cm. Throughout the pilot test, arsenic concentrations and certain other physicochemical parameters were measured in both raw water and treated water to determine the efficiency of the processes. In addition, the materials required for continuous operation were quantified, including reagents, electrical energy consumption, spare parts and costs associated with waste disposal. This was related to the water volume produced in order to calculate the cost of one cubic meter of treated water as a basis for comparison. Both pilots operated at full production capacity, with 1 l/s for NF and 2 l/s for MF. In both cases, the arsenic present in the water was below the maximum allowable limit for arsenic concentrations according to current national potable water standards (25 µg/l), and most of the samples were below the norm recommended by WHO guidelines (10 µg/l). Both processes are effective in the control of arsenic. The microfiltration operating cost is 2.76 times less than nanofiltration, with a 30% higher initial investment cost. Microfiltration assisted by in-line coagulation is adequate for water sources where arsenic is the only ion outside the standard. Nanofiltration is recommended for wells in which there are ions other than arsenic present—such as sulphate, chloride and fluoride—in concentrations that compromise water quality, .

Keywords: arsenic, coagulation, membranes, microfiltration, nanofiltration.

Dirección institucional de los autores

M.I. César Calderón Mólgora

Subcoordinación de Potabilización
Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 288
Fax: +52 (777) 3194 381
calderon@tlaloc.imta.mx

Dra. María Laura Quezada Jiménez
M.I. Norberto Segura Beltrán

Investigadores independientes
mlquezada@gmail.com
norberto_sb@hotmail.com

Dr. Carlos Hernández Yañez

Fondo Metropolitano de la Laguna
carloshdzy@prodigy.net.mx