

Aplicación de la tecnología de membranas en el tratamiento de algunos residuos líquidos altamente peligrosos

Guillermo Calvo Brenes¹

Jesús Mora Molina²

Jaime Quesada Kimsey³

Hilda Quesada Carvajal⁴

Fecha de recepción: 12/03/2009

Fecha de aceptación: 20/06/2009

Palabras clave

Desechos líquidos peligrosos, tecnología de membranas, ósmosis inversa, metales pesados, tratamiento convencional.

Key words

Toxic liquid wastes, membrane technology, reverse osmosis, heavy metals, conventional treatment.

Resumen

Como parte de sus actividades académicas, el Instituto Tecnológico de Costa Rica opera laboratorios químicos, metalúrgicos, biológicos y microbiológicos, los cuales generan algunos desechos peligrosos debido a que son corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos, radiactivos,

inflamables y/o infecciosos. La descarga de desechos peligrosos puede contaminar el agua, el suelo y el aire. Esta contaminación puede extenderse cientos y hasta miles de kilómetros del lugar donde los desechos fueron inicialmente descargados. Los desechos peligrosos pueden ser tratados por medio de diversos tipos de tratamientos tales como los físico-químicos, biológicos, la incineración, la fijación química, el encapsulamiento, la estabilización y la solidificación. Uno de los métodos de tratamiento que adquiere cada vez mayor relevancia es la tecnología de membranas. El propósito de este proyecto fue aplicar la tecnología de membranas al tratamiento de desechos líquidos peligrosos de nuestra institución. Se probó una membrana de ósmosis inversa y un tratamiento convencional de desechos líquidos peligrosos. Para probar el método,

1. Investigador del Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: gcalvo@itcr.ac.cr
2. Investigador del Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: jmora@itcr.ac.cr
3. Investigador del Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: jaimе.itcr@gmail.com
4. Investigadora del Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: hquesada@itcr.ac.cr

se escogieron dos desechos líquidos peligrosos que se generan en el Laboratorio de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) regularmente en cantidades significativas. Antes de exponer la membrana a estos líquidos, fue necesario hacerles un pretratamiento para neutralizar, eliminar oxidantes fuertes, y reducir la concentración de cationes que pudieran bloquear la membrana.

Abstract

As a consequence of its academic activities, the ITCR operates chemical, metallurgic, biological and microbiological laboratories. Some of the waste from these laboratories is hazardous, due to its being reactive, explosive, toxic, radioactive, flammable, corrosive or infectious. Waste discharges can pollute soil, water and air. This pollution may extend for long distances from its origin. Hazardous waste can be treated by diverse techniques including physico-chemical and biological techniques, incineration, chemical fixation, encapsulation, solidification and so on. One technology gaining relevance in actuality for certain aspects of waste treatment is membrane technology. The purpose of this project was to apply membrane technology to the treatment of hazardous wastewaters from our institution. We tested a reverse osmosis membrane along with a conventional treatment scheme. Two hazardous wastes generated in significant amounts in the Chemistral and microbiology services laboratory (CEQIATEC) were chosen for the tests. In order to avoid injury to the membrane, a pretreatment of the wastes was implemented, consisting of elimination of strong oxidants, neutralization, and reduction of the concentration of cations that could block the membrane.

Introducción

Como parte de sus actividades académicas, el Instituto Tecnológico de Costa Rica

posee laboratorios químicos, metalúrgicos, biológicos y microbiológicos, los cuales generan desechos clasificados como peligrosos debido a que son corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos, radiactivos, inflamables y/o infecciosos. La exposición a estas sustancias peligrosas ha sido asociada con un aumento del riesgo de contraer enfermedades y efectos nocivos a la salud de la población tales como muerte prematura, hiperactividad en los niños, varios tipos de cáncer, anemias, disminución de la fertilidad, enfermedades de la piel, así como daños al riñón, hígado y sistema nervioso (Lunn 1994).

La descarga de desechos peligrosos puede contaminar el agua, el suelo y el aire. Esta contaminación puede extenderse hasta cientos de kilómetros del lugar donde los desechos fueron inicialmente descargados. La presencia en el ambiente de algunas de estas sustancias ha sido relacionada con el efecto invernadero, las lluvias ácidas, la disminución de la capa de ozono, la contaminación de los mantos acuíferos y del suelo, así como con la pérdida de la biodiversidad.

Un estudio reciente llevado a cabo en la Sede Central del ITCR revela que hay aproximadamente 20 fuentes de desechos peligrosos, muchos de los cuales no reciben tratamiento adecuado, no tienen condiciones apropiadas de almacenamiento, son desechados por el drenaje de la pila hacia la planta de tratamiento del ITCR o no se cuantifican por carecer de un sistema de control de inventarios adecuado. (Quesada y Salas, 2006).

Los desechos peligrosos pueden ser tratados por medio de diversos tipos de tratamientos físicos, químicos, biológicos o por incineración. Uno de los métodos de tratamiento que va tomando cada vez mayor relevancia es la tecnología de membranas (Lunn G, 1994). Desde el desarrollo de las membranas sintéticas asimétricas en 1960, el interés en los procesos de membrana para el tratamiento de residuos líquidos

del agua de consumo humano y de las aguas residuales ha crecido rápidamente. Estas tecnologías son ahora objeto de importantes investigaciones a nivel internacional, así como de gran actividad comercial y aplicaciones a gran escala. Este crecimiento global del uso de las membranas en aplicaciones de ingeniería medioambiental puede ser atribuido al menos a tres factores: a) incremento de la presión jurídica que regula el tratamiento tanto de aguas potables como de residuales; b) incremento de la demanda de agua, lo que lleva a hacer un uso racional de la misma; y c) mayor desarrollo y comercialización de las tecnologías de membrana, así como de las industrias de aguas residuales (Mallevalle, 1998).

La tecnología de membranas permite separar especies contaminantes en los ámbitos de tamaño molecular e iónico. Debido a la versatilidad que ha demostrado su uso y a su importancia en el proceso de fabricación en muchas industrias del mundo, esta metodología está adquiriendo rápidamente aceptación global. La capacidad para producir separaciones/purificaciones muy específicas a temperaturas bajas o ambientales, con frecuencia hace que la filtración por membranas sea una tecnología más rentable que los métodos más convencionales, como los filtros rotatorios al vacío o los filtros de prensa. La filtración por membranas es una tecnología basada en la presión, en la cual el tamaño de los poros varía de un peso molecular de 100 hasta 5 micras. Las tecnologías que se incluyen son: ósmosis inversa (OI), nanofiltración (NF), ultrafiltración (UF) y microfiltración (MF) (Koros, 2002; Mora, 2003).

Por las ventajas que presenta y su versatilidad, esta metodología se ha utilizado ampliamente en distintos sectores industriales tales como el azucarero, el lácteo, el textil y el farmacéutico, así como en varias aplicaciones ambientales. El dinámico crecimiento de las aplicaciones

de la tecnología de membrana ha sido dirigido por fuerzas comerciales y ambientales. Los procesos de membrana tienen la ventaja de que, por lo general, no requieren de la adición de productos químicos agresivos, se pueden realizar a temperatura ambiente, forman una barrera absoluta para el flujo de contaminantes y son especialmente eficientes; estas características los vuelven en económicos y ambientalmente atractivos.

La forma de tratamiento óptima de una especie química contaminante es su destrucción por reacciones químicas que la conviertan en otras sustancias que sean inocuas, como es el caso del cianuro que se convierte en CO_2 y N_2 por diversos métodos oxidantes. Sin embargo, para muchas especies químicas contaminantes, quizá la mayoría, no existe una opción de destrucción como esta. Así ocurre con los elementos tóxicos, por lo que resulta necesario convertir las especies tóxicas presentes en el desecho en otras especies menos peligrosas del mismo elemento tóxico. En estos casos, la única opción es la fijación en estado sólido, sea por precipitación o por absorción. A este sólido se le da el manejo pertinente, con el fin de reducir al mínimo su movilidad, proceso que se denomina solidificación. Existen diversas opciones de solidificación que se pueden consultar en la literatura (Watson y Hornburg, 1989).

La tecnología de membranas permite reducir el volumen en que se halla disuelta o suspendida una especie contaminante, lo cual facilita el proceso para su solidificación y aumenta su eficiencia. Las membranas, sin embargo, pueden ser dañadas por sustancias fuertemente oxidantes, por ácidos y por bases fuertes, y por procesos de solidificación irreversibles de solutos que puedan ocurrir en ellas. Para evitar dañar la membrana y resguardar su buen funcionamiento, es necesario eliminar oxidantes fuertes de la solución a tratar y neutralizarla. Por lo

La tecnología de membranas permite separar especies contaminantes en los ámbitos de tamaño molecular e iónico. Debido a la versatilidad que ha demostrado su uso y a su importancia en el proceso de fabricación en muchas industrias del mundo, esta metodología está adquiriendo rápidamente aceptación global.

tanto, resulta evidente que la tecnología de membranas es de particular interés para el tratamiento de aguas residuales muy diluidas que contengan contaminantes altamente tóxicos.

En el Instituto Tecnológico de Costa Rica existen aguas residuales con contaminantes peligrosos provenientes de los laboratorios y algunas de ellas han sido identificadas y caracterizadas con el objeto de tratarlas (Quesada y Salas, 2006). Quesada y Salas (2006) comprobaron que los desechos peligrosos provenientes de diferentes laboratorios del ITCR son similares entre sí, por lo que se pueden tratar en conjunto y de forma centralizada con el mismo método fisicoquímico. El cuadro 1 muestra información suministrada por los investigadores Quesada y Salas (comunicación personal) sobre la

composición de varios desechos peligrosos generados en el ITCR. Nuestra investigación demostró que para el tratamiento centralizado de estos desechos puede emplearse la tecnología de membranas.

Por su parte, Chaves y colaboradores (2006) demostraron que la tecnología de membranas es aplicable en el tratamiento de aguas de consumo humano y residuales del Instituto Tecnológico de Costa Rica (sede San Carlos), que contenían especies químicas indeseables tales como nitratos y fosfatos, además de microbiológicas, como coliformes fecales. El proyecto se llevó a cabo en varias etapas: compra de equipo para el tratamiento de líquidos peligrosos por medio de membranas; adaptación del mismo para su funcionamiento a nivel de planta piloto; establecimiento de una metodología para el tratamiento de

Cuadro 1. Desechos peligrosos en los laboratorios del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser tratados.

Lugar	Cantidad (L) (g)	Composición	Concentración
Docencia química	1,0	Hg ²⁺ , Fe ³⁺ , Sn ²⁺	variable
Docencia química	1,5	Cr ⁶⁺	variable
Docencia química	1,0	Ba ²⁺ , Cr ⁶⁺ , Cu ²⁺ , Pb ²⁺ .	variable
CEQIATEC /ABS	2,5	Fe ³⁺ , Mn ²⁺ , Ni ²⁺ , Cd ²⁺ , Cr ⁶⁺ , Cu ²⁺ , Ca ²⁺ , Zn ²⁺ , Al ³⁺ , Mg ²⁺ , Pb ²⁺ ,	variable
CEQIATEC/DQO	12	Cr ⁶⁺ , Hg ²⁺ , Ag ¹⁺ .	9,51 g/1000 ml de H ₂ SO ₄ conc. De K ₂ Cr ₂ O ₇ 0,5% m/m de AgSO ₄ y 0,2g/100ml de HgSO ₄ (OJO las concentraciones anteriores son iniciales)
Forestal/Maderas	9	CuSO ₄	10%
Forestal/Maderas	7,5	CCA(cobre ,cromo y arsénico)	1,8%
Forestal/Maderas	2,5	Cu ²⁺ , Zn ²⁺ , As ²⁺	0,7%
Forestal/Maderas	10	K ₂ Cr ₂ O _{7(ac)}	5%
Biotecnología/CIB		Bromuro de Etidio	
Ingeniería de los materiales	50	Escorias o barros conteniendo cianuro, cianatos y residuos de metales ferrosos	Inicialmente el baño contiene entre 50-60% de NaCN, 32-38% de CNO ⁻ , 10-30% de K ¹⁺ y el resto es Na ₂ CO ₃
Ingeniería agrícola	0,5	K ₂ Cr ₂ O _{7(ac)}	variable
Ingeniería agrícola	0,3	Suelo + K ₂ Cr ₂ O _{7(ac)} + ácido sulfúrico	variable

desechos que contienen sales de metales pesados; cuantificación de los resultados obtenidos; y, por último, análisis del costo-beneficio en comparación con el tratamiento propuesto por Quesada y Salas.

El objetivo general del proyecto fue evaluar la tecnología de membranas en el tratamiento de residuos líquidos peligrosos generados por los laboratorios químicos de la Institución, mientras que los objetivos específicos son:

1. Adquirir un equipo de membrana para el tratamiento de residuos líquidos peligrosos.

2. Adaptar el equipo para efectuar investigaciones a nivel de planta piloto.
3. Seleccionar el desecho líquido peligroso proveniente del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
4. Caracterizar, de forma físico-química el residuo líquido por investigar.
5. Definir la metodología de tratamiento para el desecho seleccionado.
6. Medir la efectividad del tratamiento seleccionado.
7. Analizar, de manera comparativa, los costos entre el método investigado y un método de tratamiento alternativo ya existente.

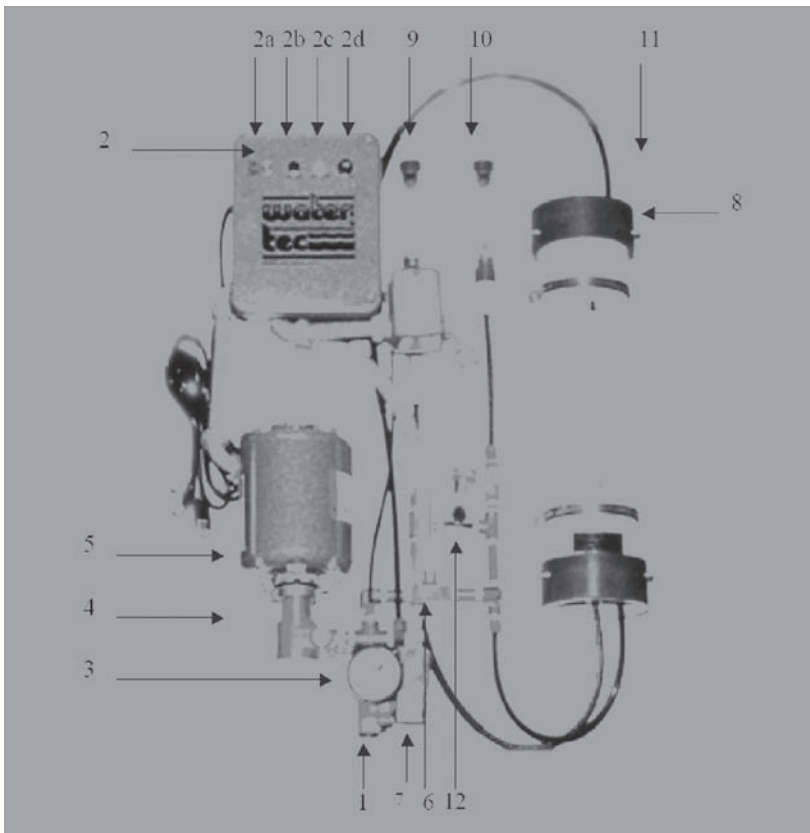


Figura 1. Diagrama general del sistema de ósmosis inversa: (1) entrada del agua de alimentación; (2) caja de control eléctrico, (2.a.) interruptor encendido/apagado; (2.b.) indicador de encendido; (2.c.) indicador de presión baja; (2.d.) fusible; (3) indicador de presión, (4) motor; (5) bomba; (6) válvula de reciclado; (7) válvula de solenoide; (8) carcasa de la membrana; (9) rotámetro del permeado; (10) rotámetro del concentrado; (11) panel de soporte; (12) salida al tanque de presión.

Materiales y métodos

Metodología

Para cumplir con los objetivos del proyecto se adquirió un equipo básico para el tratamiento de desechos líquidos peligrosos a través de la tecnología de membranas. La selección de dicho equipo se hizo de manera que permita adaptarlo para poder trabajar con volúmenes a nivel de planta piloto. Este tipo de diseño permitió simular el proceso en el laboratorio cuyo resultado se extrapole a condiciones de operación mayores, tales como en instituciones o el sector industrial.

En la figura 1 se muestra el equipo de OI que se utilizó en esta investigación, cuya parte central es una membrana espiral puesta en un formato de cartucho cilíndrico. La figura 2 muestra la membrana tipo espiral que fue utilizada. Las membranas de este tipo deben tener una entrada y dos salidas, una para el permeado y una para el concentrado.

Dado que se buscaba dar solución a problemas particulares de nuestra institución en el manejo de sus desechos, se seleccionaron desechos líquidos provenientes de un laboratorio, cuyo



Figura 2. Membrana espiral (ROC-MEM-2514-HP-FS) de 2.5" x 14", 180GPD, 200PSI y de alto rechazo.

volumen y composición representan un riesgo sanitario y ambiental significativo. Se seleccionaron los desechos provenientes de los análisis de demanda química de oxígeno (DQO) y los provenientes de los análisis de metales por absorción atómica (AA) del laboratorio CEQUIATEC.

Tratamiento convencional

El siguiente diagrama muestra la metodología desarrollada por Quesada y Salas a partir de su investigación, metodología que en adelante se denomina CONVENCIONAL.

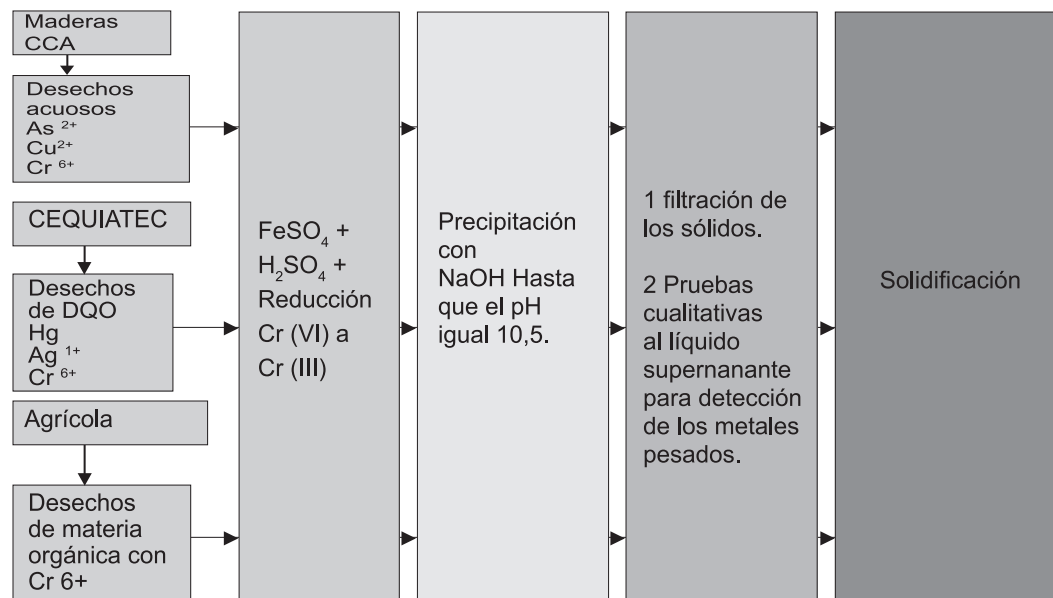


Figura 3. Esquema del proceso convencional de tratamiento fisicoquímico de mezclas acuosas de metales pesados.

Los desechos líquidos seleccionados (de DQO y AA) fueron tratados según este esquema, con el propósito de tener un resultado de referencia para comparar. A continuación se dan algunos detalles de este tratamiento de referencia (para mayores detalles refierase al apéndice).

Tratamiento con tecnología de membranas

Antes de poner el desecho en contacto con la membrana, era necesario un tratamiento preliminar que eliminara oxidantes fuertes, valores extremos de pH y especies que pudieran precipitarse al seno de la membrana y que la bloquearan. A este tratamiento preliminar se le denominará en adelante PRETRATAMIENTO, cuyo propósito es evitar daños a la membrana de OI. En el cuadro 3 se detalla este pretratamiento (para mayores detalles refierase al apéndice). Nótese la simplicidad comparativa del método desarrollado en esta investigación.

Los sólidos resultantes se separaron y el líquido remanente pasó a la segunda fase

Cuadro 2. Detalle del tratamiento convencional (Quesada y Salas, 2006), para tratar 300 L de desecho.

	Acción	Propósito
1	Ajustar el pH por encima de 10,0 con NaOH al 25%.	Oxidación de materia orgánica y cianuros en concentración por debajo de 200 ppm.
2	Añadir disolución de hipoclorito de sodio [NaClO] al 13% en una relación de (5Cl ₂ /2CN= 6,83gramos/1gramos o hasta que [ORP] > 400mV.	
3	Agitar con aire durante 30 minutos manteniendo el pH por encima de 10,0 y el ORP> 400 mV.	
4	Ajustar el pH a 2,8 con H ₂ SO ₄ al 10% con agitación.	Reducción.
5	Añadir disolución de sulfato ferroso, no menos de 880 gramos y bisulfito de sodio, no menos de 62 gramos o manteniendo el ORP = +500 mV.	
6	Mantener el pH = 2,8 por 20 minutos.	
7	Ajustar el pH a 5,1 con NaOH al 25%.	Procedimiento para tratar mercurio en bajas concentraciones y sustancias orgánicas.
8	Añadir entre 2,5 y 5 kg de carbón activado.	
9	Mantener el pH = 5,1 por 30 minutos con agitación.	
10	Ajustar el pH entre 7,5 - 8,0 con NaOH al 25% y mantenerlo durante 20 minutos.	Eliminación de fluoruro, ácido fósfórico, y arsénico.
11	Ajustar el pH a 10,8 con NaOH al 25% y agitar con aireación durante 30 minutos.	Eliminación de amonio.
12	Añadir disolución al 40% de cloruro de hierro (III) (FeCl ₃) y mantener el pH>10.	Floculante.
13	Ajustar el pH a 10,8 (NaOH).	Eliminación de metales pesados.
14	Agitar con aire y mantener el pH = 10, 8 por 30 minutos.	
15	Ajustar el pH a 8,0 (H ₂ SO ₄).	
16	Añadir un coagulante polimérico (no aniónico).	
17	Filtrar.	
18	Ajustar el pH a 7,0 (H ₂ SO ₄).	

Cuadro 3. Detalle del pretratamiento de los desechos líquidos peligrosos realizado en este proyecto.

	Acción	Propósito
1	Agregar 2 g de lana de hierro por cada litro de disolución; 24 horas de reacción.	Eliminación de oxidantes fuertes.
2	Basificar con NaOH al 100% m/V hasta pH ≤ 9.	Precipitación de hidróxidos, óxidos y sulfuros insolubles.
3	Agregar Na ₂ S acuoso saturado, con mezclado intenso por unos minutos; 24 horas de reacción.	
4	Ajustar el pH a 11. Sedimentación por 24 horas.	
5	Filtrar el líquido decantado a través de un filtro grueso de hilo de tela deshilachada (mecha).	Separación del líquido a tratar con membrana.
6	Reservar los sólidos para su tratamiento por solidificación.	

de tratamiento, que consistió en la filtración mediante OI. El sólido resultante se debe solidificar (tratamiento de solidificación) para estabilizar cualquier sustancia tóxica que se encuentre presente. De la filtración se obtuvo un concentrado y un permeado; el concentrado era la fracción líquida en que quedan los solutos disueltos, mientras que el permeado era la fracción líquida en que la concentración de solutos era mucho menor y que debía poder ser desechada sin tratamiento adicional. El concentrado debe mezclarse con residuos nuevos y ser reincorporado al proceso de pretratamiento. Así, el desecho líquido tratado es el permeado.

Es importante indicar que la solución pretratada del residuo de DQO fue sometida a enfriamiento a -2°C y a decantación para poder separar la mayor parte del sulfato de sodio que contenía. Con ello se hizo posible tratar la solución remanente con la membrana. Esto se explica en mayor detalle en el apéndice.

Otro detalle que es necesario resaltar con respecto al método aquí desarrollado es que tiene dos puntos de retroalimentación que son determinantes para su efectividad,

pero también para su funcionamiento. El primero de ellos se ubica en el tratamiento con la membrana, donde el concentrado resultante de dicho tratamiento se retroalimenta hacia la solución sin tratar, en forma continua, hasta que la eficiencia del proceso sea demasiado baja, es decir, hasta que la razón de flujos de permeado/concentrado sea de 1% o menos, dependiendo de los contaminantes que se traten en cada caso. El segundo punto de retroalimentación del método se halla en la incorporación del concentrado final al proceso de pretratamiento, con lo cual el método inherentemente produce, a partir del desecho original, un agua purificada como desecho líquido. El esquema de la figura 4 ilustra el método con sus puntos de retroalimentación.

Es importante indicar que la solución pretratada del residuo de DQO fue sometida a enfriamiento a -2°C y a decantación para poder separar la mayor parte del sulfato de sodio que contenía.

Evaluación de la efectividad de los tratamientos

Se evaluó la efectividad de las dos modalidades de tratamiento midiendo concentraciones iniciales y finales de la mayoría de los contaminantes presentes en las muestras. En el caso de los desechos de DQO, se midieron las concentraciones

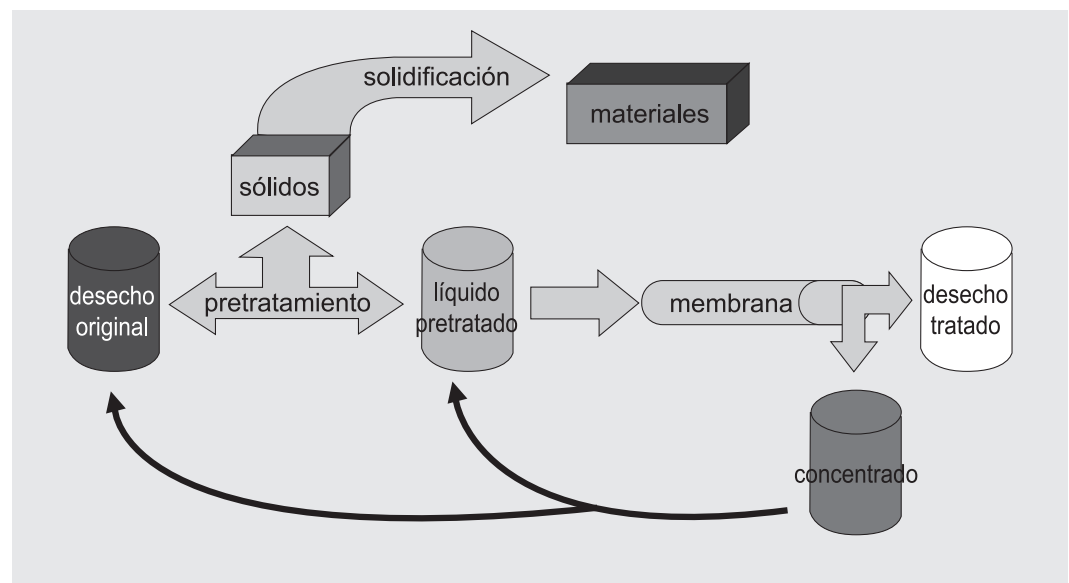


Figura 4. Esquema del tratamiento desarrollado en esta investigación.

de mercurio (Hg), plata (Ag) y cromo (Cr). En el caso de los desechos de AA, se evaluaron contenidos de cromo (Cr), plomo (Pb), níquel (Ni), cadmio (Cd) y cobre (Cu). Se utilizaron métodos analíticos recomendados en la vigésima edición de “Standard Methods for the Examination of Waters and Wastewaters”. Además se evaluó el pH y la densidad.

Resultados

Los contenidos de contaminantes en las muestras sin tratar y en las tratadas se sintetizan en el cuadro 4. Se incluyen resultados de los dos procesos: el proceso convencional y el proceso con membranas. En los casos en que se indica que el resultado es menor al valor indicado en dicha celda, ese valor corresponde al límite de detección en la metodología empleada.

Para efectos de cumplir con la norma, ambos métodos dieron resultados similares y porcentajes positivos. En todos los casos, excepto los del Ni y el Hg, el pretratamiento redujo sus concentraciones por debajo de la norma. En el caso del Hg, no se cumplió la norma tampoco mediante el tratamiento con la membrana. En ese caso, el pretratamiento redujo en un factor de 33 el contenido original (de 440 000 a 13 500 veces la norma), mientras que la membrana redujo el contenido por un factor de 4 500 a 3 veces la norma, para dar un factor global de reducción cercano a 150 000. Más adelante se discute cómo perfeccionar fácilmente este resultado.

Las densidades, por su parte, muestran variaciones un tanto insólitas. Sin embargo, al ser irrelevantes para evaluar la efectividad del tratamiento, no se considerarán más en este documento. La

Cuadro 4. Caracterización de muestras tratadas y sin tratar, ambos métodos.

Especies medidas	Contenidos iniciales (mg/L)	Tratamiento Con membrana		Tratamiento convencional	Norma (mg/L)
		M. Pretratada (mg/L)	M. Tratada (mg/L)	M. Tratada (mg/L)	
DQO					
Hg	4400	135	0,03	0,01	0,01
Ag	2516	<0,5	<0,5	<0,5	1
Cr	1041	0,2	<0,25	<0,03	1,5
pH	0,32	12,73	11,47	12,26	6-9
Densidad	1,173	1,1203	--	1,14	--
AA					
Cr	0,33	0,04	<0,04	<0,04	1,5
Pb	0,5	<0,5	<0,2	<0,14	0,5
Ni	1,46	1,57	<0,2	<0,2	1
Cd	1,85	<0,02	<0,03	<0,03	0,1
Cu	<LD	<0,015	<0,2	<0,05	0,5
pH	0,56	12,16	8,84	8,65	6-9
Densidad	1,006	--	1,1427	1,0201	--

Nota: M corresponde a “muestra”.

figura 5 es una ilustración del efecto que se consigue mediante el tratamiento con membrana. Un efecto similar se consigue por el método convencional.

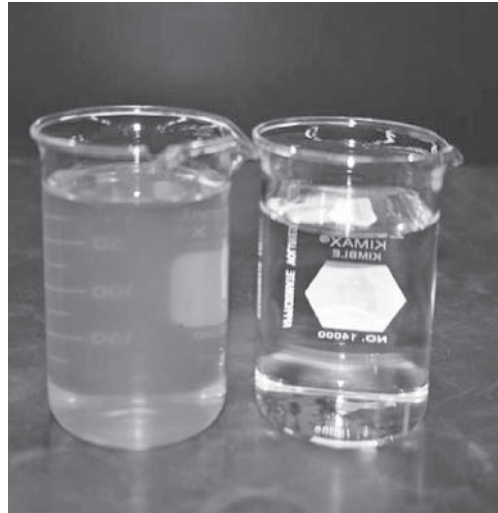


Figura 5. Muestras de residuo líquido de DQO sin tratar (izquierda) y tratado con el método de membranas (derecha).

El cuadro 5 muestra las presiones y flujos que se lograron en el tratamiento con la membrana. Es evidente que la presión aplicada en el tratamiento del residuo de la DQO fue mucho mayor. Asimismo, es evidente que la proporción del flujo de permeado fue mucho menor. Con ello queda claro que la eficiencia del tratamiento con membrana fue mucho mayor para el residuo de AA.

Cuadro 5. Presiones aplicadas y razones de flujos obtenidas en el tratamiento de los residuos pretratados, con la tecnología de membranas.

	Residuo de AAS	Residuo de DQO
Presión sobre membrana / bar	5	14
Flujo de permeado / f. concentrado	0,3	< 0,05

Costos comparados

Los cuadros 6 y 7 muestran los costos asociados a cada metodología para tratar un litro de residuos líquidos de AA y DQO. No se cuantificaron las horas-persona ni la energía.

El tratamiento de los residuos de DQO con la metodología desarrollada en esta investigación resultó un 50% más barato. Además, el proceso es más simple comparado con el método convencional, lo que implica menos tiempo-persona y menores posibilidades de error en el tratamiento con membranas.

En relación con los residuos de AA, el método convencional tiene un costo menor, aunque ambos costos son ínfimos. El tiempo-persona requerido es similar en ambos tratamientos, y el método convencional resultó ser más simple en este caso particular.

Discusión de los resultados

La efectividad de los tratamientos

En el cuadro 3, resulta claro que el pretratamiento aplicado para acondicionar las muestras a la membrana logró reducir las concentraciones de la mayoría de los contaminantes a niveles similares a los logrados con el método convencional. En cuanto a procedimiento, el pretratamiento es similar al tratamiento convencional, excepto que se aplica una sola vez y es mucho más sencillo. Algo más sobre la complejidad del método convencional es que cuando fracasa alguna de las partes del tratamiento destinadas a reducir la concentración de un grupo específico de contaminantes, esa parte del tratamiento se repite hasta que se logra la reducción requerida. Este aspecto se discutirá más adelante cuando se hable de la complementariedad de los métodos.

La excepción representada en el mercurio fácilmente se resuelve incorporando un ingrediente del método convencional,

Cuadro 6. Costos asociados al tratamiento de 1 litro de residuos líquidos de DQO.

Reactivos importantes	Costo (\$/kg)	M. Convencional		M. Membranas	
		Cantidad (g)	Costo (\$)	Cantidad (g)	Costo (\$)
NaOH	1,40	500	0,70	180	0,252
FeSO ₄ .7H ₂ O	0,90	2,90	0,003	---	---
Carbón activado	2,55	16	0,04	---	---
Fe	14	---	---	2	0,03
Na ₂ S		---	---	5	
Mecha	1,00	---	---	6	0,006
		Total	0,743		0,288

Cuadro 7. Costos asociados al tratamiento de 1 litro de residuos líquidos de AA.

Reactivos Importantes	Costo (\$/kg)	M. Convencional		M. Membranas	
		Cantidad (g)	Costo (\$)	Cantidad (g)	Costo (\$)
NaOH	1,40	5	0,007	12	0,017
Fe	14	---	---	2	0,03
Na ₂ S		---	---	5	
Mecha	1,00	---	---	2	0,002
		Total	0,007		0,049

que es el carbón activado. Añadir carbón activado a la mezcla antes de filtrarla para pasarla a la membrana, habría reducido al menos 100 veces la concentración de Hg disuelto, tal como se ha venido observando en el método convencional (Quesada y Salas, 2006), con lo cual la posterior aplicación de la membrana habría bastado para cumplir sobradamente con la norma.

En cuanto al pH, que sobrepasa la norma en varios casos de muestras tratadas, debe quedar claro que ajustarlo al valor permitido no representa ningún obstáculo, por lo que el pH no resulta ser un criterio relevante para evaluar la efectividad del tratamiento.

La alta concentración de alguna sal en un desecho, evidentemente, compromete la efectividad y la eficiencia de su tratamiento con membranas, además, agrega un paso de precipitación de la sal al pretratamiento. En el caso del sulfato de sodio proveniente del desecho de DQO, se logró precipitar la mayor parte mediante enfriamiento, un procedimiento simple y barato. Aún así, como se muestra en el cuadro 4, la proporción de permeado fue menor a 5%, lo que implica un mayor gasto de energía y tiempo, así como menor eficiencia. Por lo tanto, en algunos casos con soluciones altamente concentradas podría ser preferible prescindir del tratamiento con membrana.

Características de los métodos

Si bien el pretratamiento del desecho tiene el propósito de acondicionarlo, de la manera más simple posible, para que no dañe la membrana, se logró con él casi lo mismo que con el método convencional completo. En el caso del desecho de DQO, el pretratamiento fue más simple que el tratamiento convencional, pero no así con el desecho de AA; el pretratamiento es, en todo caso, simple, pero en ese último caso el tratamiento convencional lo fue más.

El método desarrollado aquí y el convencional comparten la característica de que su configuración depende de los contaminantes contenidos en el desecho. Las diferencias principales del método aquí desarrollado residen en que el pretratamiento debe ser lo más simple posible, y en que hay un paso final de tratamiento con membrana.

Hay una diferencia implícita en el tratamiento con membrana que, sin embargo, vale la pena resaltar. Al ser la tecnología de membranas un medio para concentrar solutos, y al generarse un concentrado que se reincorpora al pretratamiento, el líquido que se desecha al final tiene concentraciones de todos los solutos iónicos mucho menores que las que puede alcanzar el método convencional. Así, las cantidades absolutas de especies tóxicas a descargar a los cuerpos de agua se reducen drásticamente, en comparación con el método convencional. Otra consecuencia del tratamiento final con membrana es que la opción de diluir el líquido tratado para cumplir las normas y poder descargarlo, ya no entra en consideración, lo cual es positivo.

La dificultad de obtener un permeado a partir del desecho de DQO, debido a su altísima concentración original de ácido sulfúrico, nos sugiere, sin embargo, que la OI es óptima para desechos líquidos con bajas concentraciones totales, en los

que hay sustancias altamente tóxicas que conviene eliminar en su totalidad.

Complementariedad de los métodos

Al ser el pretratamiento aquí presentado semejante al tratamiento convencional, puede plantearse la aplicación de la membrana como un paso final después de aplicar una versión simplificada del tratamiento convencional. El tratamiento con la membrana otorga una reducción de la concentración del orden de cientos o miles, con lo cual se evitan las repeticiones de partes del procedimiento que no hayan dado un resultado del todo satisfactorio.

El tratamiento por membranas puede proponerse, por lo tanto, como un método complementario más que sustitutivo. Las ventajas de la aplicación de la membrana en el combinado serían la simplificación del método convencional y la reducción radical de las cantidades absolutas de especies tóxicas que se descargarían a los cuerpos de agua. Además, la tecnología de membranas puede aplicarse como un paso previo al tratamiento convencional en aquellos casos en que la concentración total de solutos sea muy baja y resulte conveniente concentrar.

Limitaciones

Una de las limitaciones de la tecnología de membranas en el tratamiento de aguas residuales y desechos es que su eficiencia en la separación de especies no iónicas, sobre todo las de menor tamaño y menor polaridad, es relativamente baja. Esta limitación no se experimentó en nuestro trabajo, debido a que los desechos escogidos no contenían sustancias orgánicas. Otra de las limitaciones de la OI es que en un líquido con alta concentración de una sal, la permeación es baja y el método se torna ineficiente. Ello obliga a buscar métodos de precipitación de las sales antes de

Una de las limitaciones de la tecnología de membranas en el tratamiento de aguas residuales y desechos es que su eficiencia en la separación de especies no iónicas, sobre todo las de menor tamaño y menor polaridad, es relativamente baja.

aplicar la OI, con lo cual se aumenta la complejidad del proceso.

Conclusiones

La tecnología de membranas demostró ser una herramienta valiosa y complementaria del tratamiento convencional de los desechos líquidos, con la cual se logran las ventajas de simplificar el tratamiento y de poder reducir, de manera radical, las cantidades absolutas de especies tóxicas que se deben descargar a los cuerpos de agua luego de haber tratado un desecho líquido.

Las limitantes que tiene el tratamiento con membrana son su eficiencia reducida cuando hay altas concentraciones de sales y su reducida capacidad para separar sustancias orgánicas poco polares. Estas limitaciones se deben atender mediante la aplicación de técnicas como la adición de carbón activado o la precipitación de las sales mediante la reducción de su solubilidad.

Este proyecto, además de dar los resultados obtenidos y los conocimientos antes descritos, ha facilitado la construcción de un equipo de escala mediana para el tratamiento de cantidades significativas de líquidos. Este equipo, perteneciente al CIPA, podrá servir para el apoyo de la docencia y la investigación, así como para el tratamiento de desechos tóxicos peligrosos en un futuro.

Recomendaciones

Se recomienda elaborar nuevos esquemas de tratamiento de desechos líquidos peligrosos a partir del método convencional elaborado por Quesada y Salas (2006), para obtener versiones simplificadas que incorporen el empleo de tecnología de membranas y aprovechen la complementariedad de ambas técnicas. Estos esquemas deberían probarse en muestras reales.

Se recomienda la aplicación del equipo construido para la resolución de problemas

concretos de aguas residuales provenientes de otros procesos de la institución y de procesos externos de empresas privadas.

Se recomienda también la aplicación del equipo a la resolución de otros problemas de la industria que no necesariamente incluyan el tratamiento de desechos.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) y, en especial, a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) por el apoyo tanto financiero como administrativo. También agradecemos al Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA) y al Laboratorio de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) por su gran respaldo al proyecto.

Bibliografía

- Chaves, A. y colaboradores. (2006). Resumen Ejecutivo: *Implementación de la tecnología de membranas en el tratamiento de aguas de consumo humano y residual*, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Koros W.J. (2002). What is Membrane Science?, *Journal of Membrane Science* 196, 147-153.
- Lunn G, Sansone, K. (1994), *Destructions of Hazardous Chemicals in the Laboratory*. A Willey-Interscience publication. New York.
- Mallevalle J. y colaboradores. (1998). Water Treatment membrane Processes, *American Water Works Association Research Foundation Publications*.
- Mora, J. (2003). Tratamiento de aguas residuales industriales por filtración de membranas y preevaporación. Tesis doctoral.
- Salas, J.C., Quesada, H. (2006). Informe: II Fase del Proyecto Manejo de Desechos Peligrosos en los Laboratorios del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Watson y Hornburg. (1989). Low-energy Membrane Nanofiltration for Removal of Colour, Organics and Hardness from Drinking Water Supplies. *Desalination*.

Se recomienda la aplicación del equipo construido para la resolución de problemas concretos de aguas residuales provenientes de otros procesos de la institución y de procesos externos de empresas privadas.