

Proyecto TC 1306.1 Mecanismos de transporte de aniones mono y polivalentes en membranas de nanofiltración.

Informe final

Participantes:

César G. Calderón Mólgora

José de Jesús Linares Ocampo

2013.

Contenido

Proyecto TC 1306.1 Mecanismos de transporte de aniones mono y polivalentes en membranas de nanofiltración.....	i
Resumen ejecutivo.....	i
1. Objetivo.....	1
2. Antecedentes.....	2
3. Marco teórico.....	3
3.1. Ejemplos de aplicación de flujo inverso.....	5
4. Metodología.....	7
4.1. Circuito de membranas planas.....	7
4.2. Banco de pruebas para membranas enrolladas en espiral.....	9
4.3. Reactivos, agua y equipos analíticos.....	9
4.4. Pruebas con membranas planas.....	10
4.5. Pruebas con membrana enrollada en espiral.....	11
5. Resultados.....	12
5.1. Membranas planas.....	12
5.2. Pruebas con membrana enrollada en espiral.....	14
6. Conclusiones y recomendaciones.....	20
7. Referencias.....	21

Anexo 1. Curvas de calibración de los electrodos.

Anexo 2. Datos de las pruebas.

Índice de figuras.

Figura 4.1 Diagrama de instalación de la celda de membranas planas.....	8
Figura 4.2. Vista del circuito para membrana plana.....	9
Figura 4.3. Diagrama de flujo del banco de pruebas para membranas enrolladas en espiral.	9
Figura 5.1. Eficiencia de la membrana NE70 de CSM para remover fluoruros, a distintos pH, en función de la presión de alimentación.....	12
Figura 5.2. Eficiencia de la membrana NE70 de CSM para remover cloruros, a distintos pH, en función de la presión de alimentación.....	13
Figura 5.3. Eficiencia de la membrana NE70 de CSM para remover ioduros en función de la presión de alimentación.....	14
Figura 5.4. Desempeño de la membrana NE70-4040 para la remoción de ioduros en función de la concentración del ión.	15
Figura 5.5. Eficiencia de remoción de cloruros y ioduros de la membrana NE70-4040.....	16
Figura 5.6. Remoción de aniones de una mezcla compleja por parte de la membrana NE70-4040.	17
Figura 5.7. Eficiencia de la membrana NE70-4040 para remover los distintos aniones de la mezcla.	18
Figura 5.8. Remoción de los aniones al variar la concentración de SDT sin modificar las proporciones.....	19

Resumen ejecutivo.

Con el fin de Identificar condiciones fisicoquímicas que provocan desplazamiento en contra del gradiente de concentración de aniones monovalente en membranas de nanofiltración con carga eléctrica negativa y en presencia de aniones multivalentes se efectuaron pruebas de desempeño con una membrana plana modelo NE70 y con su formato comercial NE70-4040 de la marca CSM.

Para el desarrollo de las pruebas se utilizaron dos circuitos de nanofiltración, el primero fue para la membrana plana y se utilizó una celda de alta presión que utiliza cupones de membrana plana de 153 cm². Posteriormente se utilizó un banco de pruebas para una sola membrana membrana comercial en el formato enrollado en espiral. La membrana tiene un diámetro de 10.16 cm y una longitud de 101.6 cm.

En las pruebas se observó que la membrana es capaz de retener fluoruros, cloruros e ioduros con distintas eficiencias. El pH alcalino favorece la retención de estos aniones y en la medida que el pH se torna ácido la eficiencia de remoción, de los tres aniones, disminuye.

Con las distintas pruebas aplicadas se observó que la remoción de estos aniones también muestra una relación inversa con la concentración inicial de sólidos disueltos totales en el agua a tratar. Asimismo, se pudo constatar que la energía de hidratación de los iones muestra una relación directa con el nivel de rechazo por parte de la membrana. Los fluoruros que presentan la mayor energía de hidratación de los aniones estudiados, son los que la membrana removi6 de forma más eficiente.

Tanto los cloruros como los ioduros son susceptibles de sufrir un rechazo negativo por parte de la membrana estudiada, es decir, que la concentración de estos aniones sea mayor en el agua tratada que en el agua antes del tratamiento. Los fluoruros, por su parte, no mostraron rechazo negativo en ninguna de las pruebas realizadas. Las condiciones que favorecen la ocurrencia de este fenómeno son, la concentración de sólidos disueltos totales en el agua a tratar, la proporción entre aniones monovalentes y polivalentes, y el pH de la solución.

Proyecto TC 1306.1 Mecanismos de transporte de aniones mono y polivalentes en membranas de nanofiltración.

1. Objetivo

Identificar condicionantes fisicoquímicas que provocan desplazamiento en contra del gradiente de concentración de aniones monovalente en membranas de nanofiltración con carga eléctrica negativa y en presencia de aniones multivalentes.



2. Antecedentes

Durante el desarrollo del proyecto "Disminución del costo de la remoción de metales en agua para consumo humano mediante el uso de membranas destinadas al ablandamiento del agua" se observó que algunos iones, como lo cloruros, eran retenidos con eficiencias menores que otros aniones con menor peso molecular, como los fluoruros. Asimismo se observó que en mezclas multiónicas, los cloruros no solo no eran retenidos por la membrana de nanofiltración, sino que aumentaban su concentración en el permeado. Esta condición se hacía más evidente a medida que aumentaba la concentración de aniones polivalentes, tales como sulfatos, en el agua.

Este comportamiento, se consideró que podría tener efectos tanto positivos como negativos para la aplicación del proceso de nanofiltración. Positivos ya que podría permitir una separación diferenciada de algunas sustancias en el agua para la remoción de algún ión específico. Por otra parte, si el flujo inverso se presenta con aniones asociados con algún metal pesado, la calidad final del agua nanofiltrada podría no satisfacer requisitos de calidad del agua para uso y consumo humano haciendo inviable la aplicación del proceso para el tratamiento del agua.

3. Marco teórico.

Yaroschuck (2008) revisó diversos casos en que reportan rechazos negativos de solutos en procesos de nanofiltración. Por definición, el rechazo negativo de un soluto ocurre cuando su concentración en el permeado es mayor que en la solución de alimentación. En varios casos la causa de este fenómeno es el incremento de concentración del soluto en el interior de la membrana (fase de membrana). El caso más sencillo corresponde a un soluto (sea o no electrolítico) cuya concentración de equilibrio al interior de la membrana sucede por efecto de una solvatación preferencial. Adicionalmente si el acoplamiento entre el flujo volumétrico y el flujo del soluto no es muy débil, la transferencia de volumen por efecto de la presión dará lugar al rechazo negativo para cualquier flujo volumétrico que traspase la membrana.

Otro caso de mayor complejidad tiene que ver con que la membrana sea expuesta a diversos solutos iónicos, para mantener a la membrana eléctricamente neutra, la concentración de los iones permeantes y del mismo signo aumentan al interior de la membrana, con respecto a la solución de bulto (bulk solution). Nuevamente, si el acoplamiento entre el flujo volumétrico y de iones permeante no es muy débil, el rechazo del ión permeante se vuelve negativo. Para que esto suceda es esencial la presencia de al menos dos iones distintos pero del mismo signo y que uno de ellos no pueda penetrar en la membrana o sea fuertemente repelido ésta, ya sea por efectos de estericidad o por una exclusión dieléctrica de iones con carga múltiple que da lugar a un arrastre de iones con menor carga eléctrica, pero del mismo signo, al interior de la membrana.

Entre los casos de rechazo negativo más frecuentemente observados se encuentran los de iones monovalentes en presencia de iones polivalentes. Una explicación cualitativa, que se ha dado al fenómeno, es que en membranas con carga eléctrica superficial, los co-iones monovalentes reemplazan a aquellos iones polivalentes, fuertemente excluidos por efecto electrostático, para mantener el interior de la membrana (fase de la membrana) eléctricamente neutra. Fane *et al.* (2005), se pronuncian en este sentido y señalan que para un sistema que contiene dos especies químicas con cargas del mismo signo y siendo la primer especie impermeable para la membrana y la segunda permeable para la membrana, el equilibrio del efecto Donnan aumentará el transporte de la segunda especie a través de la membrana. Se puede suponer que el transporte de la especie permeable a la membrana está definido por dos componentes: 1) transporte por convección debido al acoplamiento de la especie con el solvente; y 2) transporte por difusión como resultado del efecto Donnan.

El efecto Donnan fue descrito por Overbeek (1956) de la siguiente forma. Considérese un sistema iónico de dos fases en el cual un componente con carga está restringido físicamente a una fase, pero los iones de cualquier otra especie pueden moverse libremente entre las dos fases. Tal situación puede ocurrir cuando dos soluciones electrolíticas son separadas por una membrana semipermeable que permite que los iones pequeños pasen a través de ella, ya sea por sus poros o por difusión, pero bloquea el paso de los iones de mayor tamaño. Como resultado se desarrollará una distribución desigual, de los iones difusibles, entre las fases mientras que las concentraciones iónicas se ajustan para igualar el potencial electroquímico en cada fase. Esto provoca un diferencial de presión osmótica y un diferencial de potencial eléctrico entre las fases. Este tipo de equilibrio iónico es denominado equilibrio Donnan.

Vezzani y Bandini (2002) afirman que el equilibrio Donnan no es suficiente para explicar el alto rechazo que las membranas de nanofiltración muestran para los cationes polivalentes ya que el fenómeno es favorable para cationes con particiones al interior de membranas cargadas negativamente y consideran que la Exclusión Dieléctrica (ED) es un efecto de partición adicional en las interfases entre la membrana y las soluciones externas. El efecto primario es causado por la diferencia que existe entre la constante dieléctrica de una solución acuosa y el valor correspondiente de la matriz polimérica (membrana).

Otros investigadores consideran que además del efecto dieléctrico hay factores adicionales que determinan el rechazo diferenciado de los iones. Kelewou y colaboradores (2011) señalan que el rechazo de los iones depende de la energía de hidratación del ion en la solución, mientras mayor sea su energía de hidratación del ion será más fácilmente rechazado por la membrana. Esta idea se apoya en el Lhassani *et al.* (2000 citado por Kelewou y colaboradores 2011), quienes propusieron una ecuación empírica que relaciona el peso molecular del ion con su carga eléctrica (valencia funcional) para calcular la energía de hidratación de los iones.

$$E_{hyd} = 148 + 556 * (q^2 / M^{(1/3)}) + 576 * (q^2 / M^{(1/3)})^2.$$

Donde q es la valencia del ión

M es el peso molecular del ión.

Partiendo de dicha ecuación la mayor energía de hidratación le corresponde a iones polivalentes como fosfatos y los sulfatos. La secuencia de energía de hidratación con base en dicha ecuación es $PO_4 > SO_4 > F > Cl > HCO_3 \approx NO_3 > Br > I$. Aparentemente, el rechazo de los aniones, en soluciones unitarias es más o menos consistente con dicha secuencia. Por otra parte, cuando se utilizan compuestos en los que el anión está asociado con cationes polivalentes, es decir se libera el doble o el triple de aniones cuando la sal se disocia, el nivel de rechazo de los aniones disminuye. Así el rechazo de cloruros cuando se tiene una solución de NaCl es mayor que cuando se tiene una solución de $CaCl_2$. Cuando predominan iones con alta energía de hidratación, los iones con menor energía de hidratación son los más susceptibles de ser atraídos por la membrana de nanofiltración, y al no establecer un enlace covalente con la membrana pueden pasar a través de ella, aun en contra de su gradiente de concentración.

El pH de la solución también juega un papel importante en el rechazo de los iones y dependiendo del intervalo en que se ubique la solución a tratar puede experimentar un efecto positivo en el rechazo de sales. Childress y Elimelech (2000) realizaron pruebas a distintos pH para membranas de nanofiltración y como parte de los resultados obtenidos señalan que un incremento en el pH se refleja en un incremento en la remoción de sales, especialmente en las membranas de nanofiltración de menor rechazo nominal, ya que en ellas el rechazo se debe tanto a la exclusión por tamaño (estericidad) como a la repulsión electrostática de co-iones. Esta última es más importante para el rechazo de especies iónicas. Para membranas poliméricas con carga superficial negativa, a $pH > 4$ observaron el rechazo negativo de protones $[H^+]$ lo que demuestra el comportamiento clásico de un co-ion de mayor movilidad en una mezcla de electrolitos.

Por su parte Mänttari y colaboradores (2006) analizaron el comportamiento de distintas membranas poliméricas de NF en el intervalo de pH que señalan los fabricantes que sus productos pueden tolerar (2 a 11 en forma general, pero con excepciones). Ellos concluyen que

las membranas con carga eléctrica negativa aumentan el rechazo de iones monovalentes en el intervalo alcalino y en general el menor rechazo se encuentra en el punto isoeléctrico de la membrana o a un pH muy cercano al ese punto. Sin duda, el pH de la solución juega un papel importante en el desempeño de la membrana para remover los iones.

Luo y Wan (2013) efectuaron una revisión crítica de lo que otros equipos de trabajo han reportado en cuanto el efecto del pH sobre el desempeño de las membranas de NF en relación con el pH de las soluciones tratadas y formulan un listado de consejos prácticos para optimizar el desempeño de la nanofiltración. El primer aspecto que señalan es que ajustando el pH se potencia la selectividad de la membrana, el flux del permeado (productividad de la membrana) y se minimiza el ensuciamiento. Mediante el uso de ácidos orgánicos y elevando el pH del agua (con un álcali) se puede potenciar el rechazo negativo de iones monovalentes.

3.1. *Ejemplos de aplicación de flujo inverso.*

Fane y colaboradores (2005) documentaron el caso de una refinera de níquel en el oeste de Australia. Como subproducto de la refinación, obtienen sulfato de amonio. Dicho subproducto es vendido, en forma cristalina, para la producción de fertilizantes. Una mezcla líquida de sulfato de amonio otros materiales separados del producto principal se almacenaba en una laguna impermeabilizada con geomembrana. La geomembrana sufrió una ruptura y provocó que 55,000 toneladas de la mezcla llegaran al acuífero subyacente. Presiones ambientales y económicas obligaban a la empresa a sanear el acuífero y recuperar el sulfato de amonio.

Inicialmente se instaló una planta de ósmosis inversa de tres etapas para concentrar el sulfato de amonio en el rechazo y posteriormente, mediante un evaporador multiefecto y el permeado se utilizaba para diversos propósitos. Una limitación importante era que la concentración de cloruros en el rechazo estaba causando serios problemas de corrosión en el interior del evaporador.

Para solucionar el problema se propuso modificar la planta existente y utilizar membranas de nanofiltración para explotar su capacidad de rechazo negativo de los cloruros. Se efectuaron diversas pruebas piloto, que replicaban las características de la planta instalada. En las pruebas se observó que la concentración de cloruros (alrededor de 300 mg/l en el agua cruda) aumentaba en el permeado, de tal forma que el rechazo, en vez de los 1,764 mg/l de cloruros que entregaba la OI, presentaba concentraciones del orden de 230 mg/l, que ya no provocaba problemas de corrosión al evaporador y la concentración del sulfato de amonio en el rechazo era prácticamente la misma que la obtenida con la OI.

Gilron y su equipo (2001), señalan que la nanofiltración es un proceso ampliamente establecido para tratar agua potable y para recuperar agua residual y reactivos de proceso. Las membranas de NF son notables por su habilidad para permitir el paso de sales minerales simples, en mayor medida que las de ósmosis inversa, mientras que pueden retener sustancias orgánicas con bajos pesos moleculares (200-500 Da). Un fenómeno observado en los procesos de nanofiltración es que en mezclas de sales con moléculas orgánicas con carga y de gran peso molecular el rechazo de las sales es, con frecuencia, negativo. Esto ha sido explotado para remover la sal de la solución y concentrar tintas, fármacos y sueros. El rechazo negativo se deriva del efecto Donnan.

Luo y colaboradores (2009) utilizaron el fenómeno de rechazo inverso de iones monovalentes para la desalinización tanto del ácido iminodiacético como de la salsa de soya.



4. Metodología.

Las pruebas se efectuaron tanto en un celda para membrana plana, como en el banco de pruebas para membranas enrolladas en espiral. En ambos casos se trata de circuitos cerrados, de tal forma que tanto el permeado como el rechazo regresan al depósito de la solución, de esta forma la concentración se mantiene casi constante, las únicas pérdidas de agua son las muestras de permeado que se tomen para la determinación de los parámetros.

4.1. *Circuito de membranas planas.*

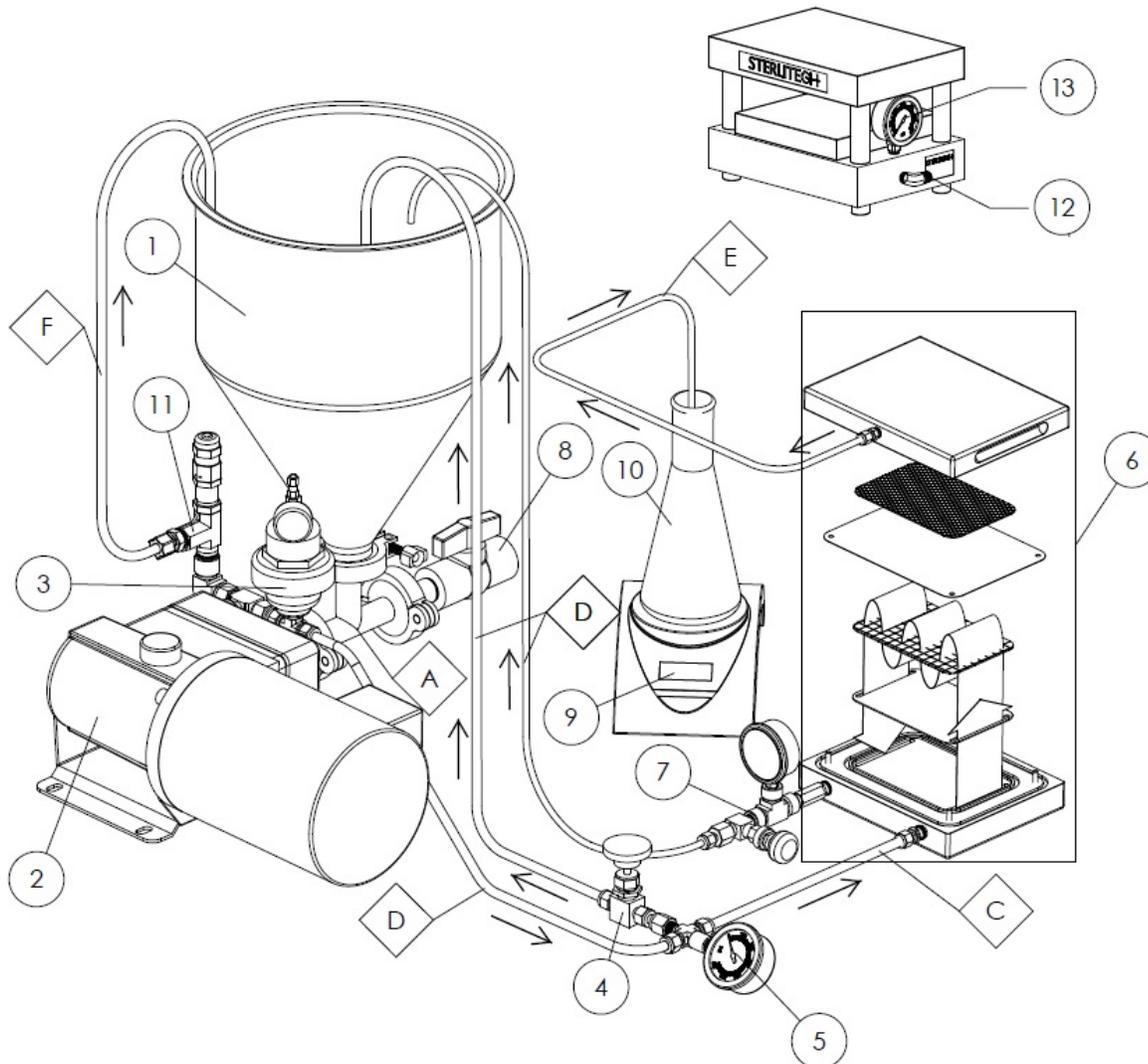
El circuito de membranas planas se montó siguiendo las recomendaciones del fabricante de la celda para membranas planas (Sterlitech), la Figura 4.1 es el diagrama de flujo básico y la Figura 4.2 es una foto del circuito.

Una vez que se coloca la membrana plana en la celda y se monta todo el conjunto, se hace circular agua a deionizada por el sistema durante 4 horas, a una presión de 4 kg/cm² y posteriormente se eleva la presión en una unidad de presión hasta llegar a 8 kg/cm². Cada vez que se incrementa la presión de alimentación, se deja fluir el agua una hora.

Una vez concluida esta etapa se presuriza el sistema desde 1 kg/cm², se deja fluir el agua durante una hora, se registra el flujo de permeado. Al cabo de una hora de funcionamiento se incrementa la presión de alimentación en una unidad y nuevamente se deja fluir el sistema durante una hora. Esto se repite hasta que se alcanza una presión de 8 kg/cm². De esta forma se determina la permeabilidad del agua pura de la membrana (Pap).

Una vez compactada la membrana y determinada la Pap, se preparan las soluciones de halogenuros de sodio (fluoruro, cloruro o yoduro) y se corre la prueba de remoción del anión de interés. Durante la prueba, al igual que en la etapa de determinación de la Pap, se van incrementando gradualmente las presiones de operación, desde 1 kg/cm² hasta 10 kg/cm², con incrementos de una unidad de presión por turno. En cada condición de presión se deja operar al sistema por al menos una hora antes de tomar una muestra para determinar los parámetros de interés (pH, conductividad, y la concentración del anión en estudio). Se mide el flujo de permeado a la presión evaluada y se registra para obtener el flux de la membrana.

Las membranas planas utilizadas fueron de nanofiltración con rechazos nominales de 70% de NaCl (GE de la serie DL y de CSM de la serie NE70).



1. Tanque de alimentación	6. Diagrama de ensamble de la celda	11. Válvula de alivio de presión.	
2. Bomba de alta presión	7. Válvula de control del rechazo/manómetro	12. Puerto hidráulico.	D. y F.Retorno de agua de alimentación.
3. Amortiguador de pulsos	8. Válvula de drenado	13. Manómetro delbastidor de la celda.	
4. Válvula de recirculación	9. Báscula (no utilizada)	A. Línea de alimentación	E. Línea de permeado.
5. Manómetro	10. Matraz del permeado	C. Manguera de alta presión.	

Figura 4.1 Diagrama de instalación de la celda de membranas planas.



Figura 4.2. Vista del circuito para membrana plana.

4.2. Banco de pruebas para membranas enrolladas en espiral.

Las pruebas se efectuaron en un circuito cerrado, el agua del depósito se transfiere mediante una bomba centrífuga de múltiples etapas controlada con variador de velocidad. La membrana utilizada fue una membrana plana enrollada en espiral con una superficie activa de 7.9 m^2 y un rechazo de NaCl de 40 - 70%. Los flujos de alimentación, permeado y rechazo se midieron mediante rotámetros de distintas capacidades y los flujos de alimentación y rechazo con manómetros de Bourdon rellenos de glicerina. La Figura 4.3 muestra un esquema del circuito de pruebas.

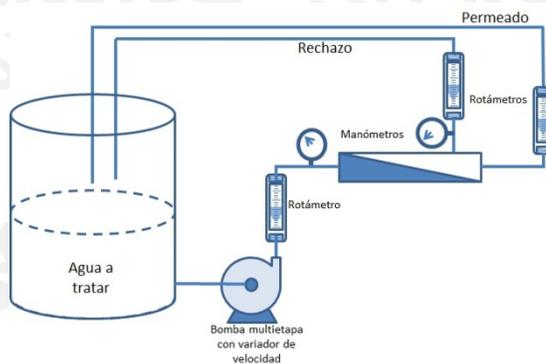


Figura 4.3. Diagrama de flujo del banco de pruebas para membranas enrolladas en espiral.

4.3. Reactivos, agua y equipos analíticos.

Los reactivos utilizados para preparar las soluciones son de la marca J.T. Baker con purezas de al menos 99.4% (fluoruro de sodio, cloruro de sodio, yoduro de sodio y sulfato de sodio). El agua

deionizada fue provista por un embotellador comercial y tiene una conductividad inicial menor o igual a que $5 \mu\text{S}/\text{cm}$.

La determinación de los fluoruros se efectuó con un electrodo marca Thermoscientific Orion 9609BNWP ionplus Sure-Flow Fluoride conectado al equipo Orion Dual Star pH/electrode ISE. Se preparó una curva de calibración del electrodo utilizando el estándar de la marca Thermoscientific lote XP1 con una concentración de $100 \text{ mg}/\text{l}$.

La determinación de cloruros se efectuó por dos métodos, en primera instancia mediante espectrofotometría con un equipo Hach modelo DR 2800, se verificó la precisión del método a partir de un estándar de $1,000 \text{ mg}/\text{l}$ de la misma marca que el espectrofotómetro. Posteriormente se utilizó un electrodo Orion 941700 chloride electrode conectado al equipo Orion Dual Star pH/electrode ISE para conectar el electrodo. La curva de calibración se preparó a partir del mismo estándar que para las determinaciones espectrofotométricas.

Para la determinación la concentración de cloruros se efectuó mediante electrodo Orion 941700 chloride electrode conectado al equipo Orion Dual Star pH/electrode ISE para conectar el electrodo. Se prepara estándar de la marca Hach con la concentración de $500, 800$ y $1000 \text{ mg}/\text{lts}$.

Para preparar el estándar, es a partir de una concentración $1000 \text{ mg}/\text{lts}$ que contiene nuestro estándar. Se prepara estándar de la marca Hach con la concentración de $500, 800$ y $1000 \text{ mg}/\text{lts}$.

La determinación de la concentración de yoduros se efectuó mediante electrodo Thermoscientific Orion 9653NWP ionplus Sure-Flow Iodide conectado al equipo Orion Dual Star pH/electrode ISE. Se preparó una curva de calibración del electrodo utilizando una solución preparada en el laboratorio a partir de yoduro de sodio de grado analítico de la marca J. T. Baker. La solución original se preparó a una concentración de $500 \text{ mg}/\text{l}$.

Las curvas de calibración de los electrodos para fluoruros, cloruros y yoduros se encuentran en el anexo 1.

La conductividad se efectuó utilizando un conductímetro de la marca wtw.

4.4. *Pruebas con membranas planas.*

Las pruebas para fluoruro y cloruro de sodio se llevaron a cabo a 3 pH distintos. La primera, fue al pH que se alcanzó al disolver el reactivo en el agua deionizada: 6.5 aproximadamente. Una vez efectuadas las determinación se agregó una solución de NaOH 0.01 M hasta alcanzar un pH neutro 7.0 . La tercera prueba se llevó a cabo con pH 9.0 . Para cada uno de los pH de prueba se aplicaron distintas presiones de alimentación de 1 a $6 \text{ kg}/\text{cm}^2$.

La solución de fluoruro de sodio se preparó a una concentración inicial de $21 \text{ mg}/\text{l}$, debido a las adiciones de NaOH 0.01 M , la toma de muestras y evaporación del agua, las concentraciones variaron entre 19.4 y $24 \text{ mg}/\text{l}$.

La solución de cloruro de sodio se preparó a una concentración inicial de 38 mg/l de cloruros, y al igual que en el caso anterior, hubo variaciones en la concentración por efecto de la evaporación del agua y por el ajuste de pH, el intervalo de concentración de los cloruros fue de 37.2 a 50.4

En el caso del yoduro de sodio, la prueba solo se efectuó en el pH resultante de mezclar el reactivo con el agua deionizada y variando la presión de alimentación. La concentración de yoduros osciló entre 24.9 y 25.2 mg/l. El intervalo de presiones fue de 1 a 10 kg/cm².

4.5. *Pruebas con membrana enrollada en espiral.*

Las pruebas con la membrana enrollada en espiral se llevaron a cabo para una recuperación de permeado del 10% y un caudal de 5 l/min, que está en el intervalo recomendado por el fabricante. En el banco de pruebas se realizaron mezclas de distintas sales de sodio.

En primera instancia se agregó de yoduro de sodio al agua. La primera solución se preparó para una concentración 0.001M, se activó el banco de nanofiltración y se midió la remoción del yodo. Se fue agregando yoduro de sodio a la solución, los incrementos fueron de 0.001 unidades molares hasta llegar a una concentración final de 0.005M. Cada vez que se incrementaba la concentración, se efectuaba la corrida en las condiciones antes descritas y se midieron los parámetros correspondientes.

Después de efectuar las pruebas con yoduro de sodio, se agregó agua deionizada al depósito del sistema para disminuir la concentración de yoduro de sodio a 0.004 M/l. Se agregó cloruro de sodio para que el sodio alcanzara una molaridad de 0.0057 (como ambos iones son monovalentes, la concentración del cloruro fue de 1.7 mmol/l). La concentración de cloruro se fue aumentando en 0.5 mmol/l en cada oportunidad, hasta alcanzar una concentración final de 3.7 mmol/l de cloruros y 7.7 de Na⁺. Al igual que con los yoduros, en cada incremento de la sal, se efectuaba la corrida correspondiente y se llevaron a cabo las mediciones de los parámetros de interés.

El siguiente ión agregado fue el sulfato. Se añadió sulfato de sodio a la mezcla que contenía 4 mmol/l de yoduro de sodio y 3.7 mmol/l de cloruro de sodio. La concentración inicial de sulfato fue de 0.28 mmol/l y para cada corrida se añadía una nueva cantidad de sulfato de sodio hasta llegar a una concentración final de 1.06 mmol/l de sulfato y 9.8 mmol/l de sodio.

Por último se añadió el ión fluoruro (como fluoruro de sodio). La concentración inicial de fluoruro fue 0.84 mmol/l (16.4 mg/l). Se aumentó la concentración de fluoruros en cuatro ocasiones más hasta que en la última prueba la concentración de fluoruros fue 2.8 mmol/l (53.2 mg/l).

5. Resultados

5.1. Membranas planas.

La remoción de fluoruros con la membrana CSM se muestran en la Figura 5.1, en ella se puede apreciar tanto cuando el pH de la solución no se ajusta como en el pH neutro, la eficiencia de remoción de fluoruros es inferior al 50 % y decrece en la medida que aumenta la presión de alimentación. La eficiencia de remoción más baja es en la condición de pH más ácido (6.5) y es en promedio 10 unidades porcentuales menor que cuando el pH es neutro y hasta 30 unidades porcentuales menor que en el pH alcalino (9).

En la prueba en que el pH se alcalinizó, se alcanzaron las mayores eficiencias de remoción. En las presiones de operación de 3 y 4 kg/cm² se observa un ligero descenso en la remoción de fluoruro pero en las siguientes mediciones, cuando la presión aumenta a 5, 6 y 7 kg/cm² se registró mayor rechazo del ión estudiado. Alcanzándose la mayor remoción a una presión de 7 kg/cm². Si bien el descenso de eficiencia de remoción en las presiones intermedias no corresponde al comportamiento normalmente reportado para las membranas de nanofiltración, el hecho de que a un pH alcalino el rechazo sea mayor, corresponde con lo reportado por diversos investigadores (Luo y Wan, 2013; Mänttari *et al.* 2006).

Sin duda, el pH juega un papel importante en la capacidad de las membranas poliméricas de nanofiltración para remover aniones.

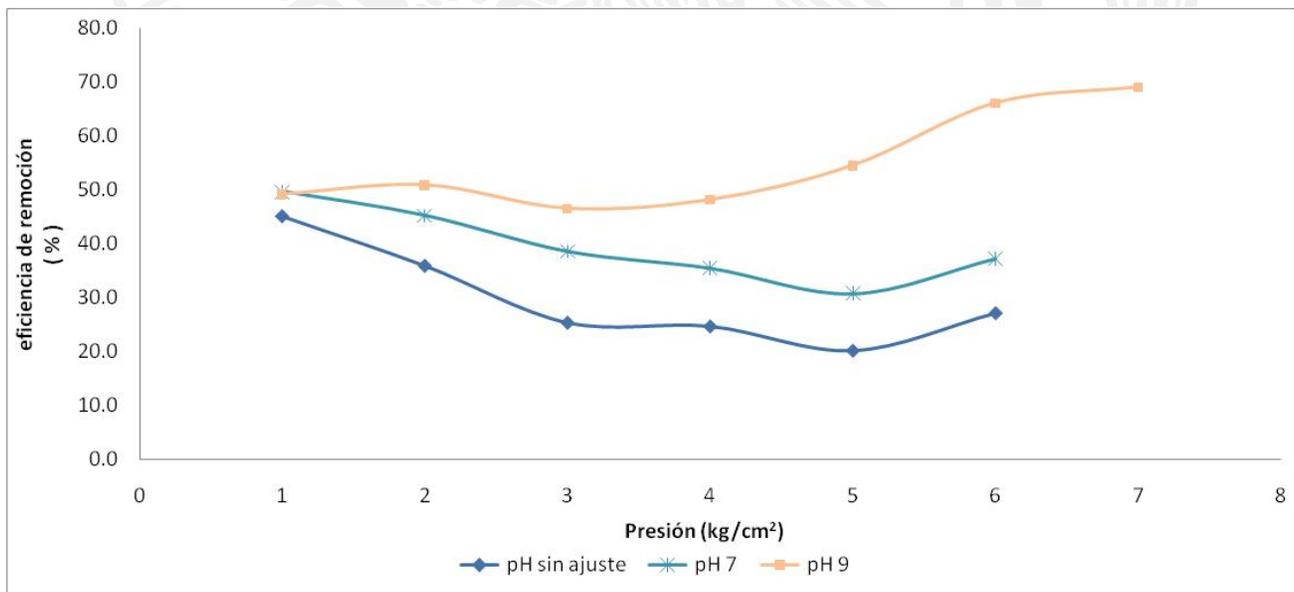


Figura 5.1. Eficiencia de la membrana NE70 de CSM para remover fluoruros, a distintos pH, en función de la presión de alimentación.

La eficiencia de remoción de cloruros con la membrana NE70 fue menor que la de fluoruros, aun así, el comportamiento guarda cierta semejanza con la remoción de fluoruros. Los resultados de la prueba se presentan en la Figura 5.2. La menor retención de cloruros ocurre con la solución sin ajuste de pH y en las menores presiones de operación (1 y 2 kg/cm²). Sin embargo, cuando la

presión de operación aumenta a 3 kg/cm² tanto la solución sin ajuste de pH y como la de pH neutro presentan la misma retención de cloruros. Cuando la presión de operación aumenta a 4 y 5 kg/cm² las más bajas eficiencias de remoción son las que se alcanzan con la solución neutra. Al aumentar la presión de operación a 6 kg/cm² el orden de las eficiencias de remoción vuelve a estar relacionado con el pH de las soluciones, alcanzándose mayor eficiencia de remoción en la medida que aumenta el pH de la solución.

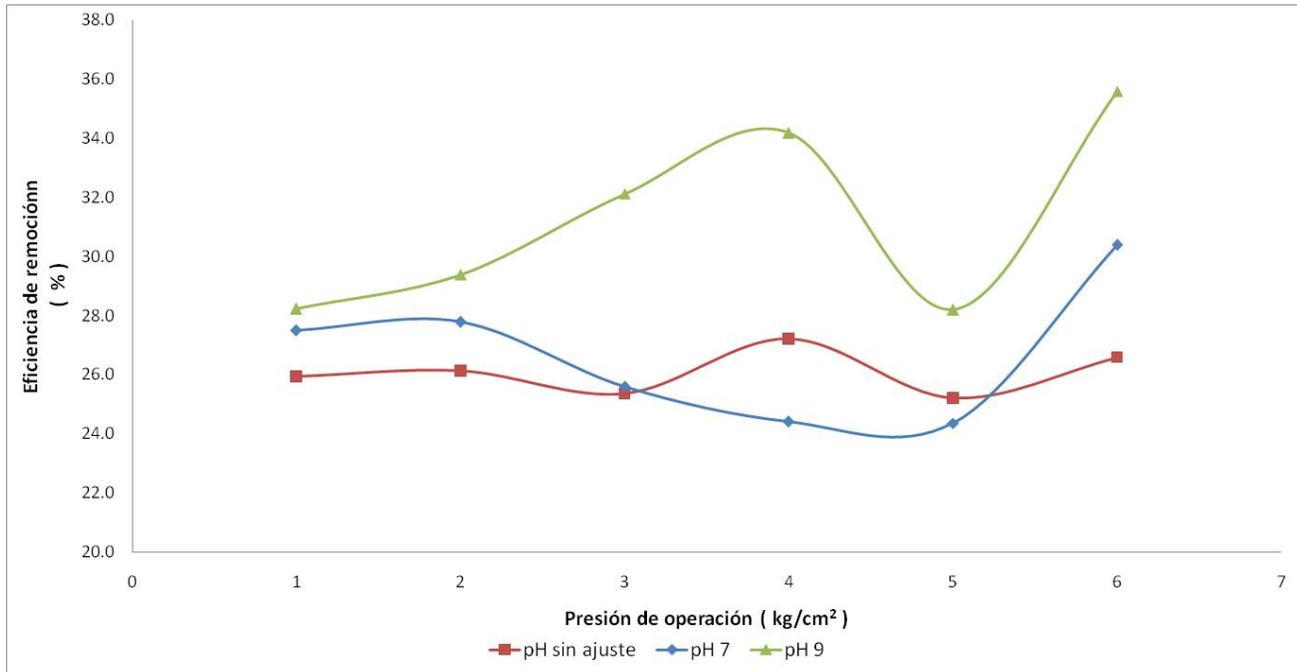


Figura 5.2. Eficiencia de la membrana NE70 de CSM para remover cloruros, a distintos pH, en función de la presión de alimentación.

Cuando el pH de la solución se encuentra en la región alcalina, se alcanzan las mayores eficiencias de remoción. Asimismo, la eficiencia de remoción tiende a aumentar con el aumento de la presión de operación. Sin embargo, cuando la presión de operación llega a 5 kg/cm² la eficiencia de remoción disminuye, situación que se aleja de la tendencia esperada. Posiblemente se trate de un error de medición. Al aumentar la presión de operación a 6 kg/cm² nuevamente aumenta la eficiencia de remoción de cloruro, y el valor registrado es el mayor de la prueba.

Nuevamente se verifica que para las membranas poliméricas, el pH de la solución tiene una influencia importante en la eficiencia de remoción de aniones y en general, el aumento en el pH de la solución se refleja en un mayor rechazo.

La prueba de remoción de ioduros se efectuó sin el ajuste de pH. El comportamiento de la membrana NE70 para la remoción de este ión también resultó sorprendente, ya que la remoción de ioduros fue mayor que la de cloruros, cuando se esperaba que el comportamiento fuera el contrario. Esta suposición se basó en la energía de hidratación de ambos iones, calculada con la ecuación de Lhassani *et al.* (2000). La energía de hidratación del ioduro es de 281 unidades,

mientras que el del cloruro es de 370 unidades y mientras mayor energía de hidratación tenga mayor rechazo por parte de las membranas de nanofiltración.

La Figura 5.3 muestra los resultados obtenidos en la remoción de ioduros del agua. Se observa que entre la primera y segunda prueba hubo un incremento en la eficiencia de remoción, pero el patrón de comportamiento fue bastante semejante. En este caso hay diferencias apreciables en la eficiencia de remoción cuando aumenta la presión de alimentación, de hecho el nivel de rechazo del ioduro, fue casi constante en el intervalo de presión aplicado.

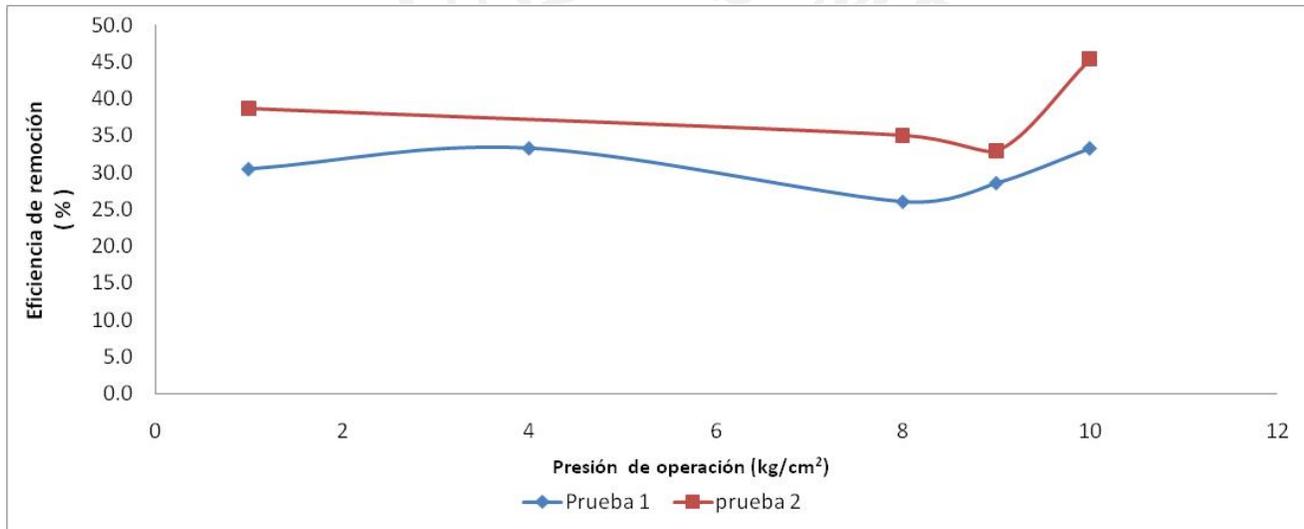


Figura 5.3. Eficiencia de la membrana NE70 de CSM para remover ioduros en función de la presión de alimentación.

En resumen se puede decir que el nivel de rechazo esperado por la membrana NE 70 de los halogenuros de sodio tiene el siguiente orden, $F > I > Cl$. El pH juega un papel importante en la eficiencia de remoción de estos iones, viéndose favorecida la remoción por el aumento del pH. En las condiciones probadas, mezclas binarias, ninguno de los iones estudiados mostró rechazo negativo.

5.2. Pruebas con membrana enrollada en espiral.

En la Figura 5.4 se muestra el desempeño de la membrana, enrollada en espiral, NE70-4040. En la medida que la concentración aumenta, la eficiencia de remoción se ve disminuida, con excepción de cuando la concentración es de 5mmol/l en que la remoción es del mismo nivel que cuando la concentración fue de 3 mmol/l. Llama la atención que el desempeño de la membrana enrollada en espiral es menor que el de la membrana plana, pero esto puede explicarse, con base en la tendencia de la membrana a disminuir el rechazo en función de la concentración. La concentración inicial de ioduro utilizado en esta prueba fue casi 6 veces mayor que para la membrana plana.

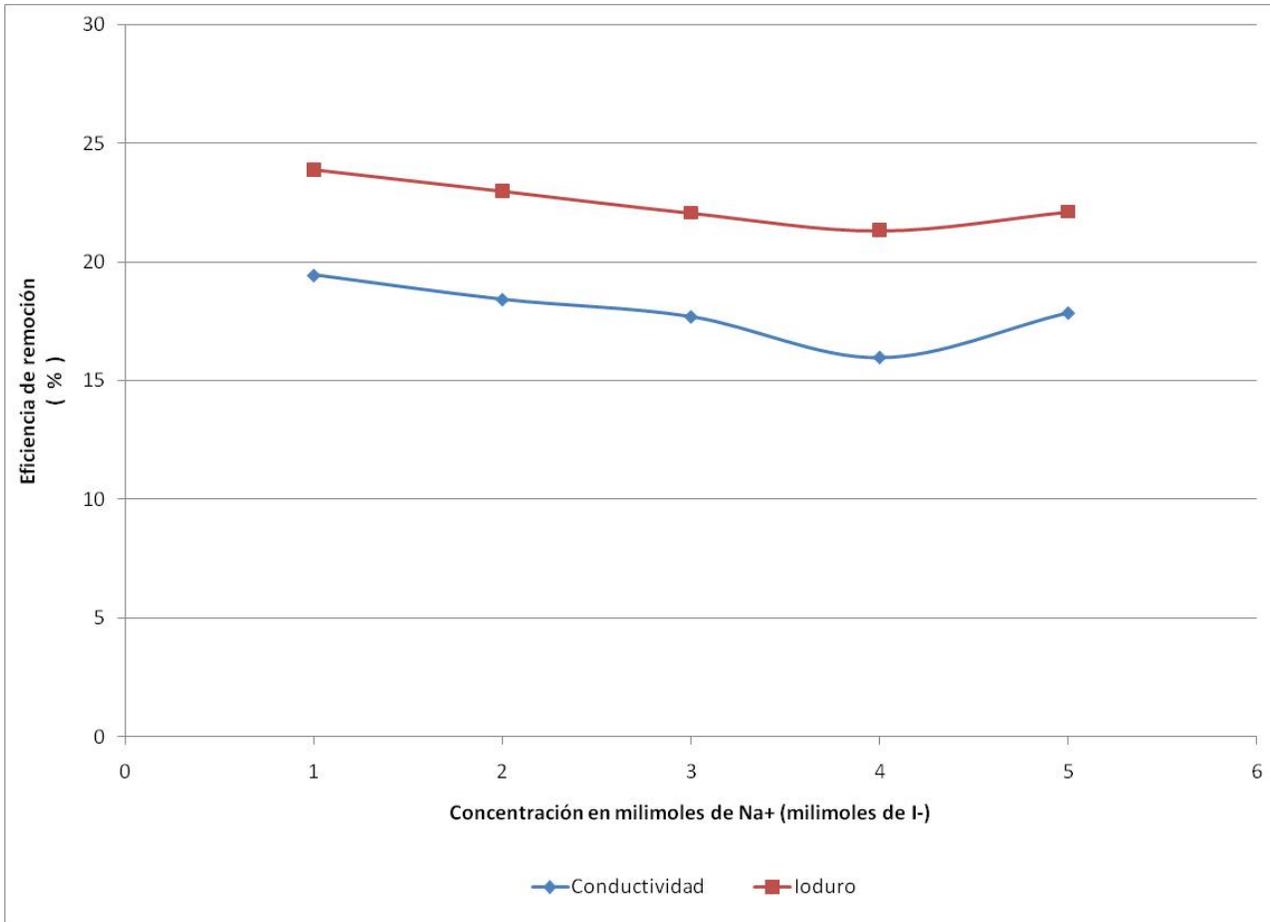


Figura 5.4. Desempeño de la membrana NE70-4040 para la remoción de ioduros en función de la concentración del ión.

Una vez visto el comportamiento de la membrana para el control de ioduros, se procedió al análisis de la primer mezcla de aniones. Se agregó cloruro de sodio al agua, tal como se describe en la metodología. La concentración de ioduros permaneció constante durante toda la prueba, mientras que la concentración de cloruro y la del sodio (catión común en todas las sales utilizadas) fueron aumentándose.

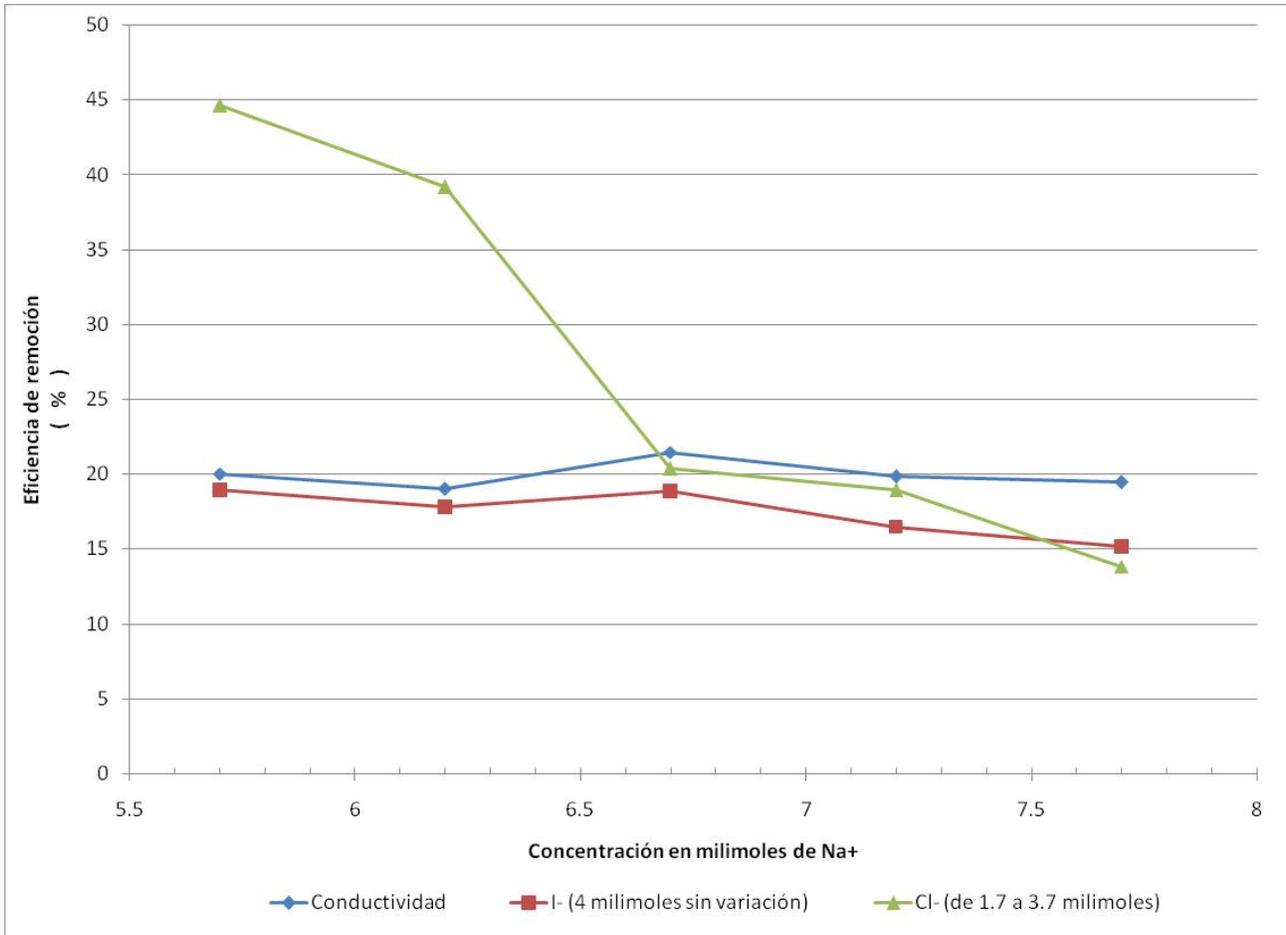


Figura 5.5. Eficiencia de remoción de cloruros y yoduros de la membrana NE70-4040.

Puede observarse que la eficiencia de remoción de cloruro en la primera condición de la prueba fue sustancialmente mayor que la encontrada en la membrana plana y mucho mayor que la del yodo, que era lo esperado en las pruebas con membrana plana (sin mezcla de aniones). Llama la atención que al ir aumentando la concentración del cloruro, la eficiencia de remoción cae abruptamente y después continúa disminuyendo pero en forma mucho más paulatina y con una eficiencia semejante a la del yoduro.

En cuanto a la conductividad se refiere, la eficiencia de remoción permanece casi constante, aunque la eficiencia de remoción de los iones individuales disminuye en forma paulatina y en forma directa con el aumento de concentración de sólidos disueltos totales en la solución de alimentación.

Se decidió iniciar las pruebas con estos dos iones, ya que son los más susceptibles de sufrir un rechazo negativo, pero en las condiciones en que se efectuaron estas pruebas, ambos aniones (yoduros y cloruros) presentan un rechazo normal, aunque bajo.

El siguiente paso dentro de las pruebas fue la adición de sulfato de sodio al agua. Como se trata de un ión con doble carga eléctrica y con una energía de hidratación mucho mayor que la de los ioduros y los cloruros, se decidió iniciar con una concentración de 0.28 mmol/l (27 mg/l) casi 20 veces menor que la de los otros aniones. La Figura 5.6 muestra el desempeño de la membrana NE70-4040 para remover los distintos aniones que componen la mezcla. Aunque la tendencia mostrada no es directa, el aumento en la concentración de sulfatos provoca una disminución de la eficiencia de remoción de ioduros y cloruros.

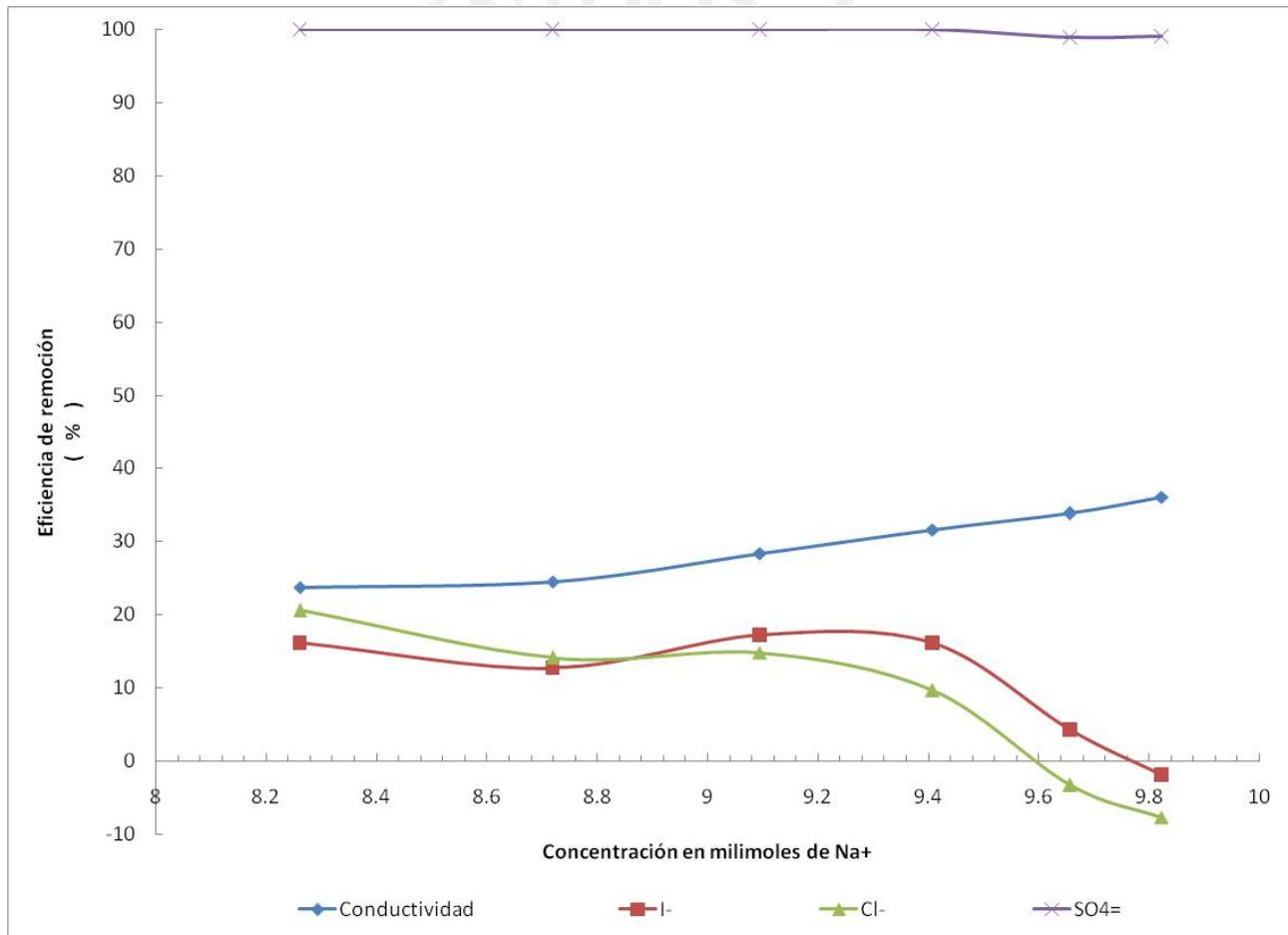


Figura 5.6. Remoción de aniones de una mezcla compleja por parte de la membrana NE70-4040.

La eficiencia en remoción de sólidos disueltos totales aumenta en la medida que aumenta la concentración de sulfatos, a pesar que la retención de cloruros y ioduros disminuye. En una proporción ioduros:sulfatos 5:1, aproximadamente, se presenta el flujo inverso de los ioduros. En cuanto a los cloruros se refiere, el flujo inverso se presenta en una proporción molar Cl:SO₄ 1.3:1 (134mg Cl/l:99 mg SO₄/l), esta proporción es común que se encuentre en agua continentales.

Aunque el fluoruro es un anión monovalente, al adicionarlo a la mezcla, y aumentar la proporción de aniones monovalentes con respecto a los divalentes, la ocurrencia de los flujos inversos de ioduros y cloruros se ve favorecida. En la Figura 5.7 se muestra el desempeño de la membrana para remover los distintos aniones presentes en la mezcla. En ella se puede observar que las

eficiencias de remoción de ioduros y cloruros fueron de muy bajas a negativas. En el caso específico de los cloruros en todo el intervalo de esta prueba el rechazo es negativo y oscila entre -3.5 y -7.3 %. En el caso del ioduro el rechazo es positivo cuando la concentración del fluoruro se encuentra en el nivel más bajo (16 mg/l), es 0 en las siguientes 3 condiciones y se vuelve negativo cuando la concentración de fluoruros alcanza los 53 mg/l. El rechazo de los fluoruros y de los sulfatos no se ve afectado por la concentración o contenido de SDT en el intervalo de la prueba.

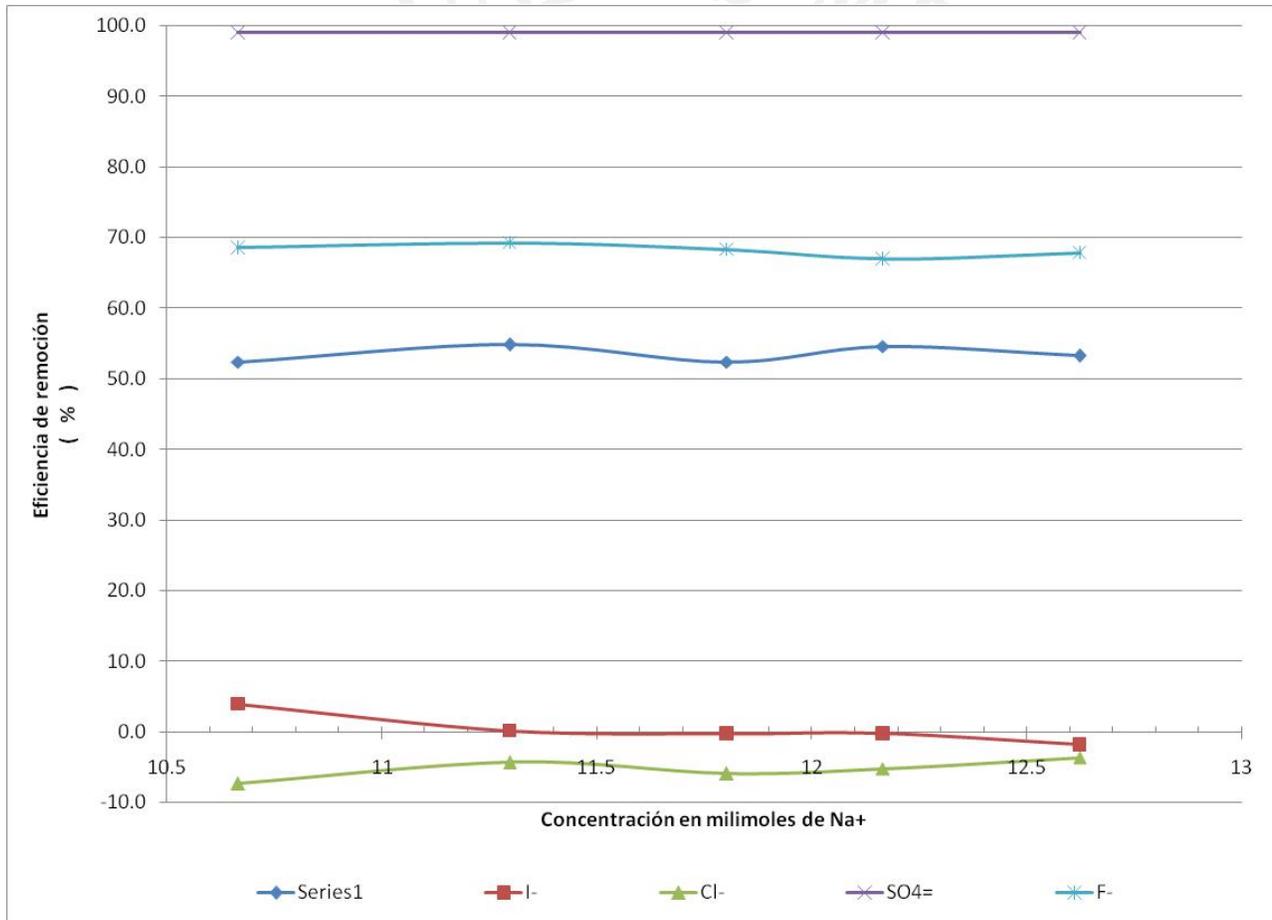


Figura 5.7. Eficiencia de la membrana NE70-4040 para remover los distintos aniones de la mezcla.

La siguiente prueba se llevó a cabo diluyendo la solución que contiene a los cuatro aniones (F-, Cl-, I- y SO₄=) de tal manera que las proporciones entre los iones no cambia, pero si la concentración de los sólidos disueltos totales y, por supuesto, la de cada ion. Se tomó una fracción de la solución y se le agregó agua deionizada para tener mezclas con el 10, 20, 30, 40 y 50 % de la solución original en Figura 5.8 se muestran los resultados obtenidos.

La capacidad de la membrana para rechazar sulfatos y conductividad parece no ser afectada por la concentración general de la solución de alimentación, ya que prácticamente se mantuvo constante la eficiencia de remoción de ambos parámetros. En el caso de los sulfatos, la tendencia mostrada es una línea recta horizontal y en el caso de la conductividad la variación es mínima,

pero la línea que describe conserva la horizontal. En cuanto a la remoción de los halogenuros si hay una disminución evidente en la medida en que aumenta la concentración de sólidos disueltos totales en el agua. El comportamiento más errático fue el de los cloruros, ya que cuando la concentración de SDT en el agua fue del 30% de la solución original se registró una remoción mayor que cuando la concentración fue del 20%. Asimismo, cuando la concentración de SDT en el agua de alimentación fue de 40% la eficiencia de remoción también fue mayor que para una concentración del 20%. Esto quizá se deba a errores de medición ya que en el caso de los otros dos halogenuros la tendencia es siempre descendente en la medida que la concentración aumenta.

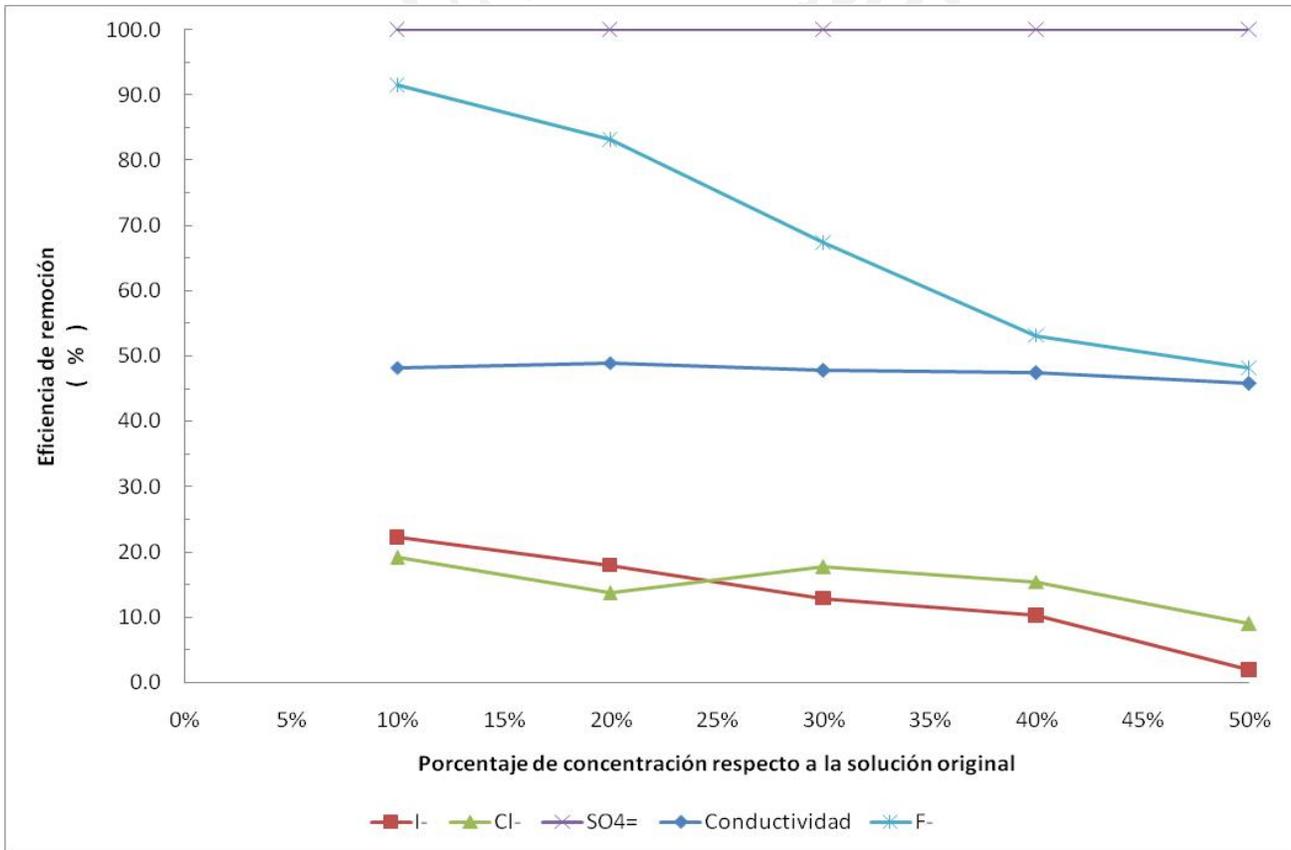


Figura 5.8. Remoción de los aniones al variar la concentración de SDT sin modificar las proporciones.

La eficiencia de remoción que más parece ser afectada es la de los fluoruros, ya que la curva muestra una pendiente descendente más pronunciada que la de los ioduros y los cloruros. Aun así, la remoción de fluoruros es mucho mayor que la de los otros dos halogenuros y es improbable que para este ión en particular se presentara una situación de flujo inverso.

6. Conclusiones y recomendaciones

La membrana NE70 y su formato comercial enrollado en espiral NE70-4040 fue sometida a pruebas para la remoción de iones del grupo químico de los halógenos: F-, Cl-, I-, tanto para soluciones binarias (el halogenuro de sodio como soluto único) como en mezclas con dos, tres y cuatro aniones incluyendo los sulfatos.

La eficiencia de remoción, por parte de la membrana estudiada, de los distintos aniones fue variable siendo los fluoruros los iones que mayor nivel de remoción alcanzaron.

La eficiencia de remoción de fluoruros, cloruros y ioduros es función del pH de la solución de alimentación, en la medida que el agua se encuentra en la región alcalina, se presenta mayor retención de estos aniones. En el intervalo de pH estudiado, los mejores resultados para los tres aniones se presentaron a pH 9, que fue el nivel más alto de pH aplicado en el estudio.

La concentración de sólidos disueltos totales en el agua de alimentación afecta la eficiencia de remoción de los fluoruros, cloruros y ioduros, a medida que aumenta su concentración en la solución de alimentación, disminuye la eficiencia de remoción de estos iones por parte de la membrana utilizada.

De los aniones analizados, los únicos que son susceptibles de mostrar rechazos negativos por parte de la membrana NE70 son los cloruros y los ioduros, siendo los primeros los que presentan el mayor potencial de ocurrencia. Los fluoruros, al menos en el intervalo de concentraciones estudiado no son susceptibles de presentar rechazo negativo.

Las condiciones que favorecen el rechazo negativo de aniones monovalentes en presencia de aniones polivalentes son: el pH, la energía de hidratación de los aniones, la concentración de sólidos disueltos totales en el agua.

Es necesario efectuar más pruebas para poder establecer un modelo matemático que describa con precisión el fenómeno de rechazo negativo de aniones por parte de membranas poliméricas de nanofiltración.

7. Referencias.

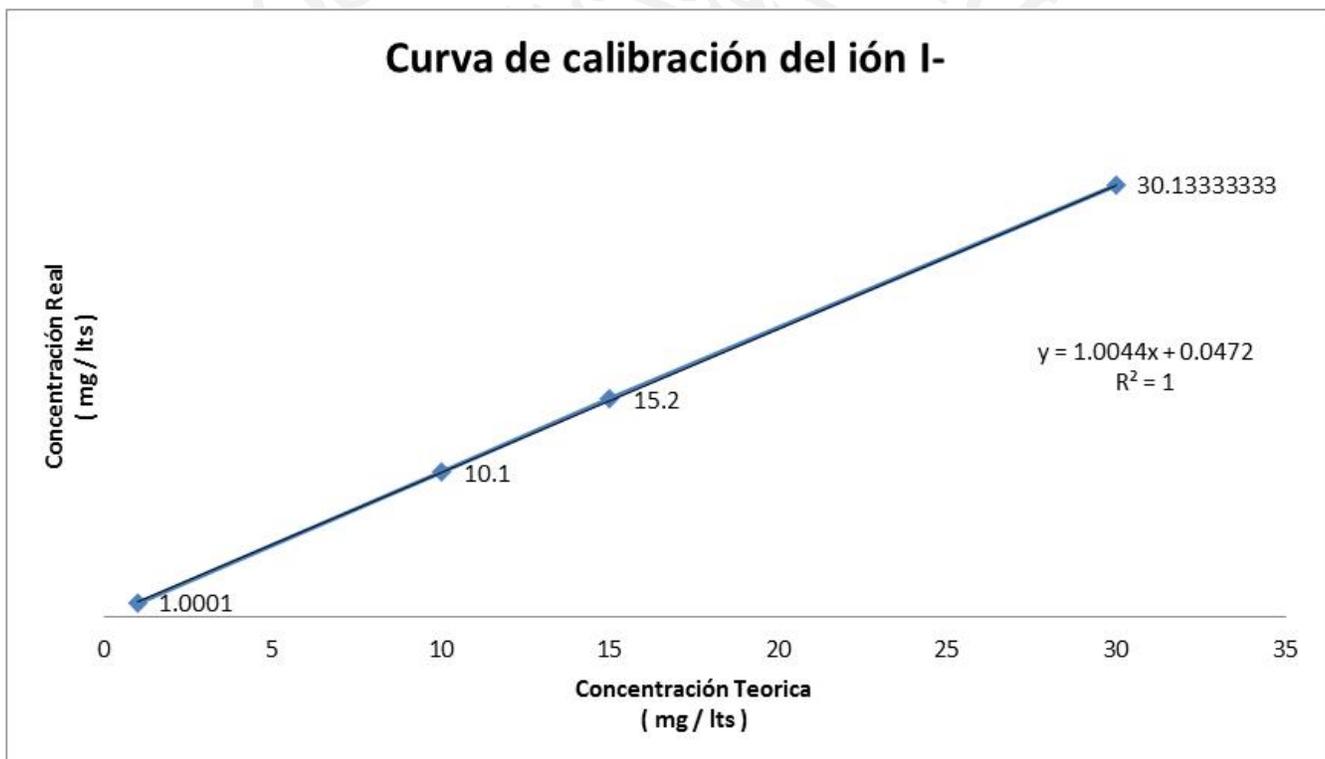
- Childress A., Elimelech M. (2000). Relating Nanofiltration Membrane Performance to Membrane Charge (Electrokinetic) Characteristics. *Environmental Science and Technology* vol. 34. pp 3710-3716
- Fane Antony G. (2005). Chapter 11 Water reclamation, remediation and cleaner production with Nanofiltration. In: Schäfer A.I., Fane A.G., Waite T.D. (Editors), *Nanofiltration: Principles and Applications*. Elsevier, Oxford, UK.
- Gilron J., Gara N., Kedem O. (2001). Experimental analysis of negative salt rejection in nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science* vol. 185. pp. 223-236.
- Kelewou H., Lhassani A., Merzouki M., Drogui P., Sellamuthu B. (2011). Salt retention by nanofiltration membranes: Physicochemical and hydrodynamic approaches and modeling. *Desalination* vol. 277. pp 106-112.
- Luo J., Wan Y. (2013). Effects of pH and salt on nanofiltration-a critical Review. *Journal of Membrane Science* vol. 438. Pp 18-28.
- Mänträri M., Pihljamäki A., Nyström M. (2006). Effect of pH on hydrophilicity and charge and their effect on the filtration efficiency on NF membranes at different pH. *Journal of Membrane Science* vol. 280. pp 311-320.
- Overbeck, J. Th. G. (1956). The Donnan equilibrium. *Prog. Biophys. Biophys. Chem.* vol. 6 pp. 57-84.
- Vezzani D., Bandini S. (2002). Donnan equilibrium and dielectric exclusion for characterization of nanofiltration membranes. *Desalination* vol. 149. pp. 477-483.
- Yaroshchuck Andriy (2008). Negative rejection of ions in pressure-driven membrane processes. *Advances in Colloid and Interface Science* vol. 139. pp 150-173.

Anexo 1.

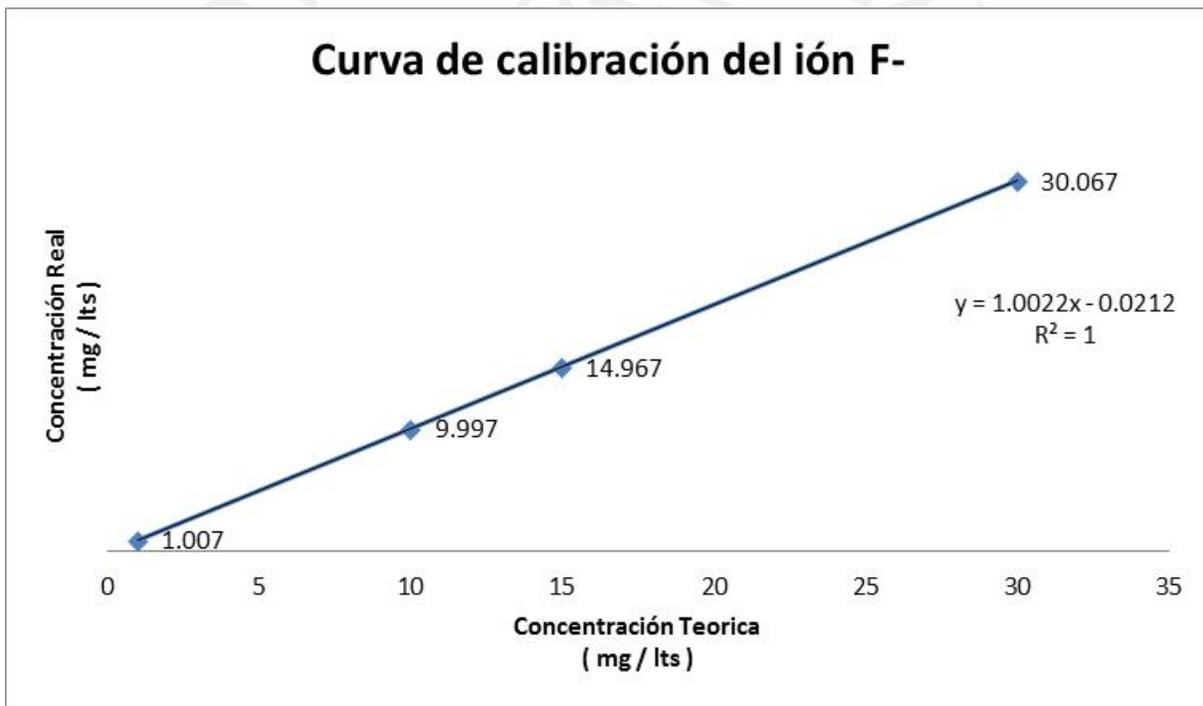
Curvas de calibración de los electrodos.



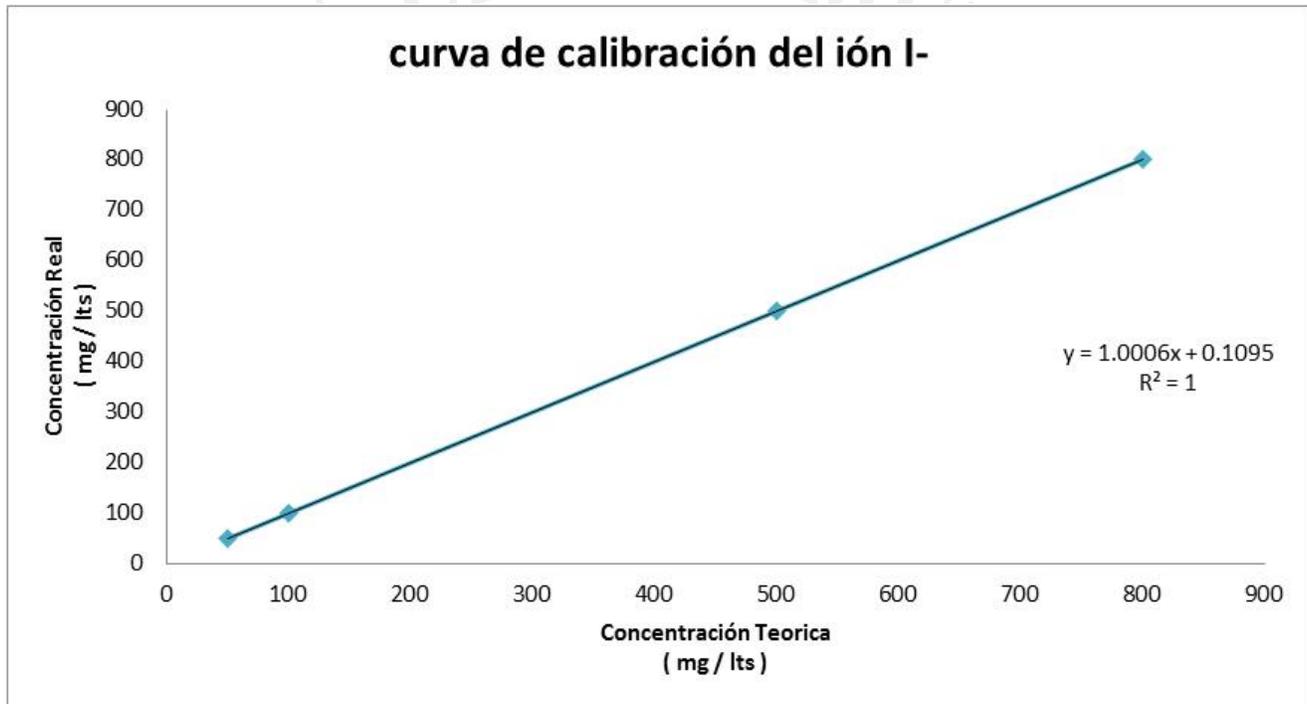
Concentración Teórica de F ⁻ mg/l	Concentración medición 1 mg/l	Concentración medición 2 mg/l	Concentración medición 3 mg/l	Promedio mg/l
1	1.0001	1.0001	1.0001	1.0001
10	10.1	10.1	10.1	10.1
15	15.4	15.1	15.1	15.2
30	30	30.1	30.3	30.1333333



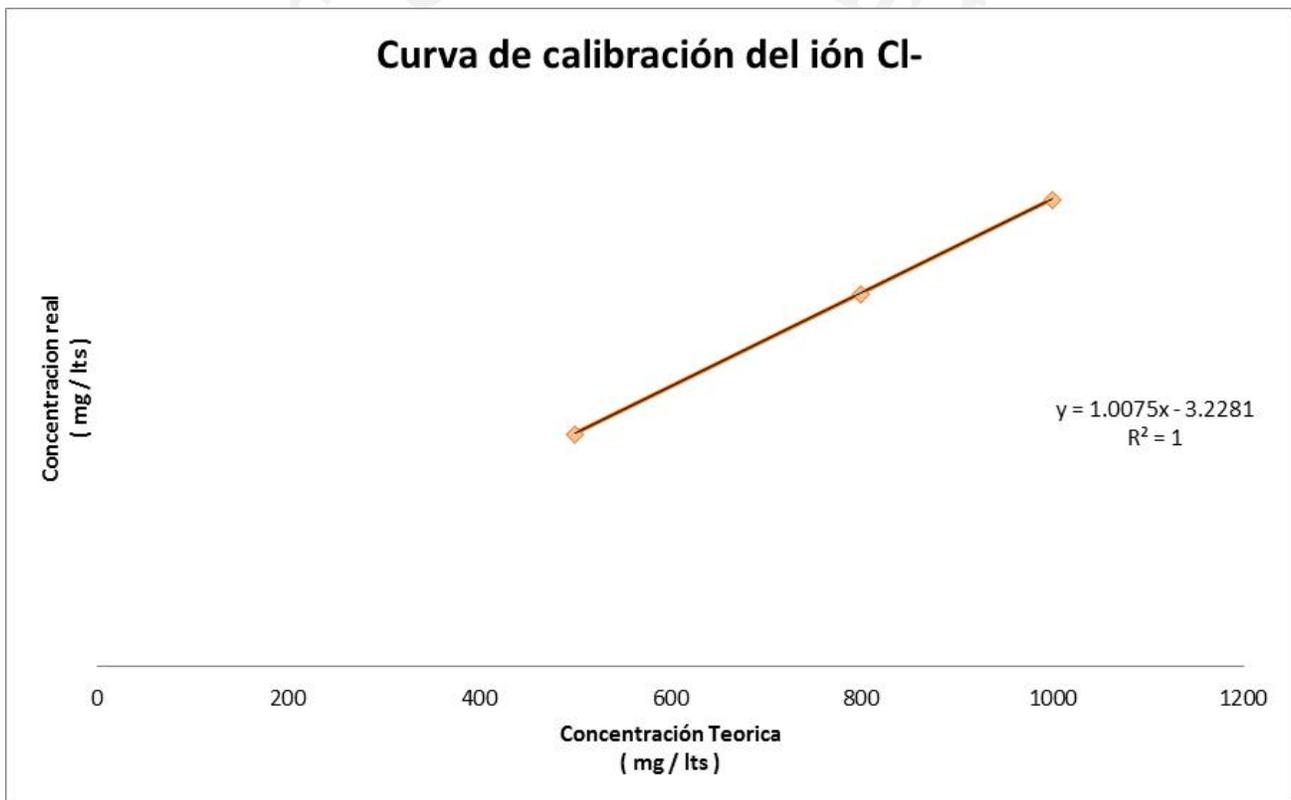
Concentración Teórica F ⁻	Concentración medición 1	Concentración medición 2	Concentración medición 3	Promedio
mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
1	1.02	1	1	1.007
10	9.99	10	10	9.997
15	15	14.9	15	14.967
30	30.2	30	30	30.067



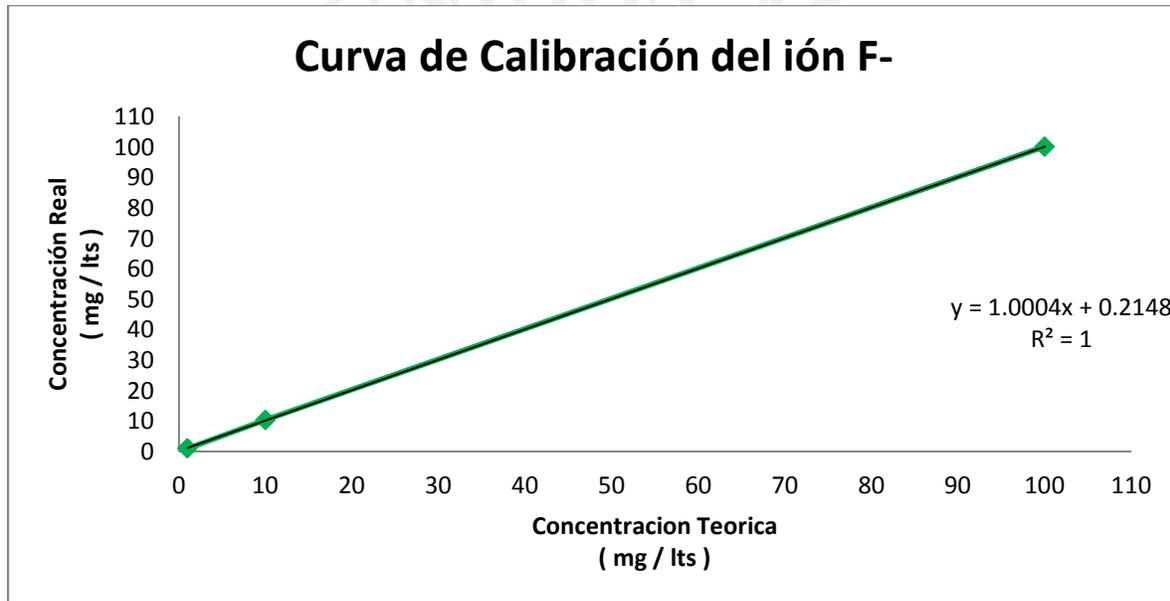
Concentración Teórica de I ⁻	Concentración medición 1	Concentración medición 2	Concentración medición 3	Promedio
mg/l	mg/l	mg/lts	mg/l	mg/l
50	50	50.1	50	50.033333
100	100	101	99.99	100.33
500	499	501	501	500.333333
800	801	800	801	800.66667



Concentración Teórica de Cl ⁻	Concentración medición 1	Concentración medición 2	Concentración medición 3	Promedio
mg/lts	mg/lts	mg/lts	mg/lts	mg/lts
500	499	505	499	501
800	801	805	799	801.66667
1000	1001	1010	1004	1005



Concentración Teórica de F ⁻	Concentración medición 1	Concentración medición 2	Concentración medición 3	Promedio
mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
1	1.03	1.13	0.99	1.05
10	10.1	10	11.1	10.4
100	101	99.7	100	100.2333333



Anexo 2

Datos de las pruebas.



Prueba ioduro membrana plana.

PRESION kg/cm	Q	Q	PRESIÓN SISTEMA PSIA	Q	AGUA CRUDA				PERMEADO				RECHAZO			
	RECIRCULACIÓN L/M	RECHAZO L/M		PERMEADO L/M	C.E.	TDS	pH	l'	C.E.	TDS	pH	l'	C.E.	TDS	pH	l'
					μs/cm	mg/lts	mg/lts	μs/cm	mg/lts	mg/lts	μs/cm	mg/lts	mg/lts	μs/cm	mg/lts	mg/lts
1	0	1.5	400	0.012	34	18	6.59	24.9	28.7	15	6.85	17.3	34.4	18	6.86	23.1
4	0.9	2.7	480	0.0135	34.2	18	6.59	24	19.8	10	6.9	16	35.3	19	6.88	24
8	0	3.5	490	0.023	35.3	19	6.5	24.9	20.2	11	6.89	18.4	35.5	19	6.91	24.2
9	0	3.5	500	0.0272	35.1	19	6.5	24.1	20	11	6.79	17.2	35.2	19	6.85	24.2
10	0	3.2	510	0.03	35	19	6.59	24.3	19.4	10	6.8	16.2	35.6	19	6.91	24.1
1	0.8	1	420	0.0028	35.3	19	6.61	24.3	18.8	10	6.1	14.9	35.3	19	6.67	24.1
8	0	3.5	420	0.026	35.5	19	6.97	25.4	19.4	10	6.38	16.5	36.2	20	6.9	25.8
9	0	3.5	430	0.029	35.7	19	6.9	25.2	19.3	10	6.54	16.9	36.1	20	7	25.9
10	0	3.5	420	0.027	35.9	19	6.9	24	19.1	10	6.15	13.1	35.9	20	6.83	24
11	0	3.5	430	0.3	36.5	19	6.79	24.2	18.8	10	6.23	15.9	35.2	19	6.79	24.3

Pruebas con cloruros. Membrana plana

							Permeado				Agua Cruda				Rechazo			
	P	Q1	Q2	Psist	Qperme	Temp	C.E.	TDS	pH	Cl	C.E.	TDS	pH	Cl	C.E.	TDS	pH	Cl
	Kg/cm2	L/min	L/min		L/min	°C	µs/cm	mg/lts		mg/Lts	µs/cm	mg/lts		mg/Lts	µs/cm	mg/lts		mg/Lts
Prueba 1 Sin ajuste de pH	1	0.4	2	420	0.0062	26.2	113.8	61	6.55	29.2	145.2	78	6.44	37.8	144.9	78	6.44	36.4
	2	1		440		26.9	112.6	61	6.44	30.4	149.7	80	6.47	37.9	150.1	81	6.43	38.2
	3	1.1	1.4	450	0.021	28	111	60	6.49	29.6	156.7	85	6.54	40	149.7	81	6.4	42.4
	4	0.9	1.5	470	0.031	26.9	114.9	62	6.57	30.8	147.6	80	6.48	42	149.8	81	6.57	42.4
	5	0.6	1.75	490	0.036	27.7	116.5	62	6.5	32.4	147.3	79	6.51	42.6	148.7	80	6.52	43.6
	6	0.4	2	510	0.04	27.9	112.4	60	6.56	29.7	147.6	78	6.52	39.2	148.2	80	6.56	40.1
	1	1.8	2	420	0.0044	27.2	107.7	57	6.43	22.4	149.2	79	6.49	31.6	151.2	80	6.46	32.8
	2	1	1.1	420	0.01	26.2	108.3	57	6.54	26.2	148.7	79	6.49	38.8	150.1	80	6.58	39.2
	3	0.9	1.5	440	0.018	26.7	109.7	58	6.56	28	149.2	79	6.5	37.2	155.6	81	6.5	37.8
	4	1.2	1.5	480	0.025	27.3	110.5	58	6.55	30.2	150.7	80	6.53	41.8	152.7	81	6.46	42.2
	5	1.1	1.5	500		27.9	112.7	60	6.52	32.2	150.9	80	6.55	43.8	152	81	6.53	44.1
	6	0.4	2	520	0.039	28.1	113.1	61	6.45	32.4	151.8	81	6.52	45.6	152.5	81	6.55	47.4
Prueba 2 pH 7.0	1	1	1.5	430	0.0042	27.2	110.3	58	6.71	28.8	150.1	80	6.98	41.8	152.6	81	7	42.6
	2	0.4	1.6	440	0.012	27.2	104.3	55	6.86	30.8	151.7	80	6.99	42.4	152.5	81	7.01	43.2
	3	0.4	2	450	0.0195	28	110.9	59	6.9	29.2	152.9	82	6.98	41.6	154.5	82	7	42.4
	4	0.4	2.25	460	0.027	28.2	110.9	59	6.88	29.7	160.3	84	6.97	40.9	155.3	83	7.02	40
	1	0.7	1.7	420	0.0048	27.5	112.9	60	6.79	30.6	146.3	78	6.98	40.2	-	-	-	-
	2	1	1.5	430	0.012	28.5	108.3	58	6.85	29	144.6	77	6.97	40.4	150.5	80	6.88	42.8
	3	0.6	2	430	0.0185	27.5	110.7	59	6.87	32.4	146.8	78	7.01	41.2	147.8	78	7.04	42.4
	4	0.2	2.25	450	0.027	28.3	110.1	58	6.9	30.8	145.7	77	7.02	39.2	147	78	6.96	40.6
	5	0.3	2.1	480	0.032	28.2	111.1	59	6.9	29.8	146.5	78	7.01	39.4	147.7	78	6.9	-
	6	0.2	2.1	500	0.038	28	104.1	55	6.84	28.4	148.4	79	7	40.8	152	81	6.92	42.8
Prueba 3 pH 9.0	1	0.5	2.25	420	0.0044	27.5	111	59	7.95	26	163.2	86	7.99	37.2	164.8	86	7.3	-
	2	0.7	1.8	440	0.015	28.1	116.5	62	7.59	28.6	163.4	87	7.59	39.4	163.9	87	7.63	-
	3	0.4	2.4	450	0.0185	27.8	118.5	63	7.4	29.6	165.5	88	7.61	42.6	165.9	88	7.61	-
	4	0.1	2.25	460	0.029	27.3	117.3	62	8.56	31.8	167.2	89	8.86	49.4	-	-	-	-
	6	0	2.1	500	0.035	27.4	105.7	56	8.84	30.4	170.8	90	8.85	48.4	172.7	82	8.8	-
	1	0.4	1.9	420	0.005	27.5	132.4	70	8.1	32.4	189.4	101	8.6	44	189.1	100	8.47	-
	2	0.7	1.7	430	0.014	27.8	128.7	69	8.08	32.8	191.6	102	8.57	47.8	191.9	102	8.48	-

							Permeado				Agua Cruda				Rechazo			
	P	Q1	Q2	Psist	Qperme	Temp	C.E.	TDS	pH	Cl	C.E.	TDS	pH	Cl	C.E.	TDS	pH	Cl
	Kg/cm2	L/min	L/min		L/min	°C	µs/cm	mg/lts		mg/Lts	µs/cm	mg/lts		mg/Lts	µs/cm	mg/lts		mg/Lts
	3	0.3	2.25	440	0.0185	28.5	136.4	71	8.22	33.4	198	105	8.3	50.4	198.8	106	8.25	-
	4	0	2.25	480	0.029	28.9	138.7	73	8.92	30.8	202	107	8.94	45.8	-	-	-	-
	5	0	2.4	480	0.028	28.9	143	76	9.12	33.6	205	108	9.02	46.8	206.5	109	9.02	49.8
	6	0	2.5	490	0.028	29.1	121.7	64	9.15	32.6	208	110	9.12	49.4	208	110	9.1	52.1
Prueba 4 sin ajuste de pH	1	1	1.5	420	0.005	26.1	57.5	31	6.42	14.9	75.1	40	6.43	20.8	76.1	41	6.43	21
	2	1.2	1.25	430	0.0125	26.5	60.7	33	6.64	14	78.8	43	6.51	20.4	77.7	42	6.51	20.9
	3	0.8	1.75	450	0.021	26.7	58.4	32	6.57	14.4	77.5	42	6.66	20.9	77.4	42	6.66	21.5
	4	0.7	1.7	480	0.03	27.3	61.3	33	6.79	14.6	77.8	42	6.74	20.3	77.7	42	6.74	20.9
	5	1.4	1	500	0.037	28	62.1	34	6.73	15.2	77.4	42	6.72	20	78.3	42	6.72	20.4
	6	0.4	2	510	0.041	28.2	63	34	6.71	14.6	77.4	42	6.63	20.9	77.9	42	6.63	21.5



Fluoruros. Membrana plana

P	Q1	Q2	Psist	Qperme	Temp	Permeado				Agua Cruda				Rechazo						
						C.E.	TDS	pH	Fluoruros	C.E.	TDS	pH	Fluoruros	C.E.	TDS	pH	Fluoruros			
						Kg/cm2	L/min	L/min	L/min	°C	µs/cm	mg/lts		mg/L	µs/cm	mg/l		mg/L	µs/cm	mg/l
Sin ajuste de pH	prueba 1	1	1.6	1.4	490	0.004	27.7	69.1	37		11.7	118.2	64		21	119	64		21.3	
		2	1	1	500	0.018	27.8	90.5	49		16	118.7	65		22.5	120.9	65		22.4	
		3	1.4	1	520	0.045	28	104.8	57		18.3	120.3	65		21.7	122.1	66		22.5	
		4	0.6	1.5	540	0.05	28.8	99.8	54		18.8	120.4	65		22.3	122	66		22.5	
		5	1	1	550	0.051	28.4	98.9	53		18.5	120.2	65		23	121.5	66		23	
		6	0.6	1.5	560	0.058	29	93.4	50		17	120.3	65		23					
	Prueba 2	1	1	1.5	400	0.0048	25.8	68.9	36		13	121	65		24	121.1	65		24.1	
		2	1	1	410	0.0135	25.8	75.3	41		14	122.5	66		24.5	123.5	67		24.6	
		3	1.3	1.25	430	0.025	26	93.5	50		15.6	121.1	65		24	122.3	66		24.3	
		4	1	1.5	450	0.037	26.1	98.3	53		16	123.1	66		24.1	123	67		24.5	
		5	0.8	1.75	460	0.048	27.3				17.2				21.7					
		6	1.3	1	500	0.048	27.6				15.6				21.7					
	Prueba 3	1	1.2	1.75	420	0.0058	25.7	77.1	42		14.5	126.4	68		23.5	126.7	68		23.6	
		3	0.8	1	460	0.0235	26.2	82	44		17.4	125.7	68		24.3	126.7	68		23.9	
		6	0.65	1.8	500	0.046	27.1	101.8	55		18.7	126.2	68		24.6	127.3	69		24.2	
	pH 7	Prueba 4	1	1.6	2.2	450	0.0048	27.9	71.6	38	6.98	9.58	140.1	74	6.93	18.8	139.4	74	6.9	18.9
			2	0.4	1.25	460	0.011	28.5	78.1	41	7.05	10.2	142.5	75	7.28	19.1	142.9	76	7.08	19.4
			3	0	1.75	480	0.017	28.5	86	46	7.27	11	142.7	76	7.12	19.1	143.5	76	6.89	19.2
4			0.4	1.5	500	0.026	29	92.3	49	7.06	11.9	143.2	76	7.03	19	143.9	76	7.03	19.1	
Prueba 5		1	2.4	1.75	420	0.0032	28.4	74.3	39	6.96	9.63	142.4	75	7.17	19.4	143.4	76	6.63	19.5	
		2	0.6	1.25	420	0.0105	27.6	82.8	41	6.88	11.1	143.8	76	7.14	19.8	144.8	77	6.56	19.8	
		3	0.5	1.9	430	0.018	28	95.7	51	6.93	12.9	145.7	77	7.25	19.8	146.1	77	6.69	20.1	
		4	0.2	2.5	450	0.026	29	100.3	53	6.91	13.6	148.9	79	7.25	20.5	149.5	79	6.61	20.6	
		5	0	2.5	460	0.032	28.1	101.7	54	7.02	13.7	145.8	77	7.15	19.8	146.1	77	6.61	19.9	
		6	0	2.5	480	0.034	29	96.1	51	6.9	12.8	150	80	7.31	20.4	150.4	80	6.65	20.5	

P	Q1	Q2	Psist	Qperme	Temp	Permeado				Agua Cruda				Rechazo						
						C.E.	TDS	pH	Fluoruros	C.E.	TDS	pH	Fluoruros	C.E.	TDS	pH	Fluoruros			
						µs/cm	mg/lts		mg/L	µs/cm	mg/l		mg/L	µs/cm	mg/l		mg/L			
Kg/cm2	L/min	L/min		L/min	°C															
pH 9	Prueba 6		1	0.6	1.8	420	0.0042	27.5	90	48	8.62	10.5	163.6	87	8.9	19.9	162.9	87	8.9	19.8
			2	0	2	420	0.105	27.7	100.3	53	8.54	11.6	166.3	88	8.99	20.2	166.4	88	8.52	20.2
			3	0	2.75	420	0.0175	27.3	101.2	54	8.53	12.3	170.1	89	8.43	20.4	170.5	89	8.54	20.5
			4	0	2.75	420	0.0235	27.9	114.6	61	8.8	12.1	181.9	96	8.81	20.4	181.9	96	8.72	21
			5	0	2.5	440	0.025	28.2	96.8	51	8.5	10.4	174.8	93	8.56	20.2	175.1	93	8.52	20.2
			6	0	2.5	450	0.02	28.2	78.2	41	9.07	7.18	185.3	98	9.14	20.2	186.5	99	8.89	20.3
			7	0	2.25	450	0.021	28.5	71.7	38	8.96	6.56	188	100	8.83	20.6	189.3	100	8.74	20.7
	Prueba 7		1	0.4	2	440	0.0034	26.2	97.4	52	8.76	10.1	188.3	100	8.86	20.7	189.2	100	8.82	20.8
			2	0	1.9	440	0.0078	26.4	86.9	46	9.05	8.63	195.4	104	8.94	21.2	195.6	104	8.91	21.3
			3	0	2.25	460	0.013	26.9	96.7	51	8.61	10.1	199.2	106	8.62	21.7	196.2	104	8.54	21.7
			4	0	2.5	480	0.016	27.1	94.3	50	8.24	9.88	213	113	8.26	22.3	203	108	8.3	22.9
			5	0	2.5	500	0.019	27.4	90.6	48	9.06	8.56	207	110	8.96	21.7	209	110	8.97	22.1
			6	0	2.5	500	0.021	28.1	85.7	45	9.41	6.81	218	115	9.23	21.1	216	115	9.27	21.4
			7	0	2.25	530	0.021	28.2	79.9	42	9.35	6.52	218	115	9.2	21.7	221	118	9.2	21.9

Ioduros. Banco de pruebas.

Concentración mM Na+ (l-)	Tpo min	Presiones				Caudal				Temp °C	▲P	▲T	AGUA CRUDA			AGUA RECHAZO			AGUA PERMEADO		
		Rech psi	Alim psi	PostFilt psi	PreFilt psi	Rech GPM	Alim GPM	Frecu Hz	Temp °C				pH	CE µs/cm	I ⁻ mg/Lts	pH	CE µs/cm	I ⁻ mg/Lts	pH	CE µs/cm	I ⁻ mg/Lts
1	30	6	56	30	25	15	1.5	16.1	24.2	50			6.85	131	126.9	6.66	135	132.57	6.61	105.51	96.592
	15	6	56	30	25	15	1.5	16.1	24.6	50											
2	30	6	56	30	25	15	1.5	16.1	26.7	50	2.1		6.82	229	253.8	6.68	251	268.76	6.71	186.79	195.46
	15	6	56	30	25	15	1.5	16.2	25.2	50									6.7	0	
3	30	6	56	30	25	15	1.5	16.2	27.5	50	2.3		6.89	340	380.7	6.51	357	395.57	6.61	279.81	296.68
	15	6	56	30	25	15	1.5	16.2	25.2	50			6.92	455	507.6				6.84	377.1	397.34
4	30	10	72	28	22	20	2	20.5	27.4	62	2.2		6.76	461	507.6	6.93	481	530.45	6.49	387.31	399.33
	15	10	71	28	22	20	2	20.5	26.8	61			6.9	513	634.5				6.8	420	495.13
5	30	10	72	28	22	20	2	20.5	29.1	62	2.3		7.09	515	634.5	7.11	528	651.58	6.72	423	494.18



