



Universidad
de La Laguna

Trabajo Fin de Grado

Titulación: Grado en Ingeniería Química Industrial

Curso 2016/17

Comparación del comportamiento de membranas de OI y NF para la mejora de la calidad del agua de abasto municipal

Autor:

Claudia Baute García

Tutores:

Fernando Díaz González
M^a del Cristo Marrero Hernández

Índice

| | |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. Resumen. | 4 |
| Abstract. | 5 |
| 2. Objetivos. | 7 |
| 3. Introducción. | 9 |
| 3.1. Agua | 9 |
| 3.1.1. Escasez y calidad de agua. | 10 |
| 3.2. Problemática del flúor en el agua. | 12 |
| 3.2.1. El fluoruro en las aguas de Canarias. | 15 |
| 3.2.2. El fluoruro en la isla de Tenerife. | 16 |
| 3.3. Soluciones a la problemática del fluoruro. | 20 |
| 3.3.1. Coagulación – Floculación. | 21 |
| 3.3.2. Intercambio Iónico. | 22 |
| 3.3.3. Adsorción. | 23 |
| 3.3.4. Procesos de membranas. | 24 |
| 3.4. Ósmosis Inversa. | 26 |
| A. Pretratamiento: | 28 |
| B. Ósmosis Inversa: | 28 |
| C. Postratamiento. | 36 |
| 4. Materiales y Métodos. | 40 |
| 4.1 Instalación experimental | 40 |
| 4.1.1 Instalación para experimentos de una etapa. | 40 |
| 4.1.2. Disoluciones de NaF. | 46 |
| 4.1.5. Instalación para experimentos de varias etapas. | 47 |
| 4.2. Métodos analíticos | 48 |
| 4.2.1 Cromatografía Iónica. | 48 |
| 4.2.2. Alcalinidad. | 49 |
| 4.2.3. Conductividad. | 50 |
| 5. Resultados y Discusión. | 53 |
| 5.1. Estudio con disoluciones sintéticas. | 53 |
| 5.2. Estudio con agua de abasto municipal de Aguamansa. | 56 |
| 5.3. Estudio con agua de la galería de Hoya del Cedro. | 58 |
| 5.4. Comparación de resultados de las dos galerías. | 61 |
| 5.5. Estudio con agua de Hoya del cedro utilizando varias etapas. | 65 |
| 5.6. Amortización del equipo a 5 años. | 69 |
| 5.6.1. Equipo de ósmosis inversa | 69 |
| 5.6.2. Agua embotellada | 71 |
| 5.6.3. Aprovechamiento rechazo del equipo. | 71 |
| 6. Conclusiones. | 74 |
| 7. Bibliografía. | 79 |
| ANEXOS. | 82 |

1. RESUMEN

1. Resumen.

Actualmente, la población mundial se enfrenta a grandes problemas debidos al crecimiento exponencial de la población, al aumento del nivel de vida, a la necesidad del desarrollo de la agricultura y a la rápida industrialización en zonas con escasez de agua, provocando la disminución y contaminación de los recursos de agua existentes.

Las Islas Canarias también se enfrentan a estos problemas. El acelerado crecimiento de la población y el uso indiscriminado de los recursos hídricos de las islas, ha ocasionado una disminución tanto de cantidad como de calidad.

La presencia de fluoruro, el aumento de la dureza tanto temporal como permanente, etc., ha provocado que las aguas de abasto municipal, de determinados municipios del norte de la isla de Tenerife, no se ajusten a los parámetros para el agua de consumo humano impuestos por el RD 140/2003, ni a la recomendación de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Con objeto de mejorar la calidad de agua de abasto municipal, se propuso la utilización de un módulo doméstico que pueda emplear tanto membranas de ósmosis inversa como membranas de nanofiltración y comparar el comportamiento de ambos tipos de membrana. Debido a la duración del estudio para ósmosis inversa, a dificultades con los equipos analíticos, etc., no se pudo llevar a cabo la comparación de las distintas membranas.

Del estudio de ósmosis inversa realizado, tanto a partir de disoluciones sintéticas como con agua de abasto municipal, con concentraciones de ión fluoruro desde 2 ppm hasta 11 ppm, se demuestra que se puede obtener un permeado cuya concentración de fluoruro en todos los casos cumple el RD140/2003. Con un recovery de entre 18-30% si se trabaja en una sola etapa o hasta el 80% si se trabaja en cinco etapas.

Abstract.

At present, the world population has major problems due to the exponential increase of the population and rapid industrialization, causing the reduction and contamination of existing water resources.

The Canary Islands also have these problems. The rapid growth of the population and the indiscriminate use of the islands' water resources have led to a decrease in both quantity and quality.

The presence of fluoride, the increase in hardness, both temporary and permanent, etc., has led to the municipal water supply of certain municipalities in the north of the island of Tenerife do not conform to the parameters for drinking water of the DR 140/2003 nor to that recommended by WHO.

In order to improve municipal water quality, it was proposed the use of a domestic module that can use both reverse osmosis membranes and nanofiltration membranes and compare the behavior of both types of membrane. Due to the duration of the study for reverse osmosis, it wasn't possible to carry out the comparison of the different membranes.

From the study of reverse osmosis made from municipal water supply with concentrations from 2 ppm to 11 ppm, a permeate is obtained whose fluoride concentration in all cases complies with RD140 / 2003. With a recovery of between 18-30% if you work in one stage or up to 80% if you work in five stages.

2. OBJETIVOS

2. Objetivos.

Se propone la utilización de un módulo de membranas doméstico que puede trabajar con membranas de ósmosis inversa o membranas de nanofiltración y comparar el comportamiento de ambos tipos para la mejora de calidad de agua de abasto municipal. Para ello, se hará un estudio bibliográfico del problema, el montaje y puesta a punto de la instalación y utilizando tanto aguas reales como disoluciones sintéticas. Se determinará:

- Las características del producto obtenido en función de la calidad del agua de alimentación.
- El grado de recuperación.
- La evolución de las características de las membranas con el tiempo.

3. INTRODUCCIÓN

3. Introducción.

3.1. Agua.

El agua es un elemento esencial para la vida. Resulta fundamental para el correcto funcionamiento de nuestro organismo y necesario para mantener el medio ambiente. El agua cubre el 71% de la superficie de la corteza terrestre. El 97,5% de esta agua se encuentra en océanos, siendo solo un 2,5% agua dulce, como indica la Figura 3.1 (USGS,2016) .

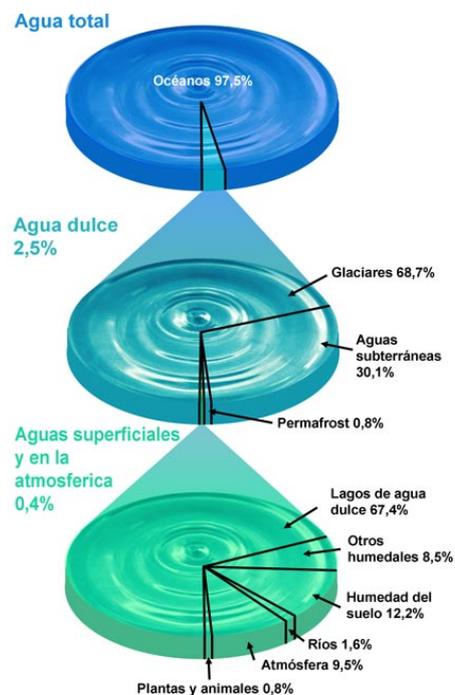


Figura 3.1. Distribución agua corteza terrestre.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define el término de “agua potable” como toda agua para consumo humano, utilizada para fines domésticos e higiene personal, así como para beber y cocinar (OMS, 2017).

Según estudios de la OMS “en 2015, el 91% de la población mundial tenía acceso a una fuente mejorada de abastecimiento de agua potable, en comparación con el 76% en 1990”. La mejora de la calidad del agua, y su gestión, puede impulsar el crecimiento económico y ayudar en gran medida a la reducción de la pobreza (OMS, 2017).

En 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas, reconoció que todas las personas tienen derecho a disponer de forma continuada de agua suficiente, para uso personal y doméstico.

El cambio climático, el aumento de la escasez de agua, el crecimiento de la población, los cambios demográficos y la urbanización ya suponen desafíos para los sistemas de abastecimiento de agua. De aquí a 2025, la mitad de la población mundial vivirá en zonas con escasez de agua (OMS, 2016). La reutilización de las aguas residuales para recuperar agua, nutrientes o energía se está convirtiendo en una estrategia importante.

3.1.1. Escasez y calidad de agua.

Como se aprecia en la Figura 3.1, del volumen total de agua disponible en La Tierra solo un 2,5% pertenece a agua dulce, de la cual un escaso 0,4%, aproximadamente, pertenece a aguas superficiales.

Hoy en día muchas regiones del mundo padecen lo que se denomina “estrés hídrico” debido al crecimiento demográfico y económico. Se habla de estrés hídrico cuando la demanda de agua es más importante que la cantidad disponible durante un periodo determinado o cuando su uso se ve restringido por su baja calidad. Este provoca un deterioro de los recursos de agua, tanto en calidad como cantidad.

Como se puede ver en la Figura 3.2, en gran parte del hemisferio sur del planeta existe escasez de agua, tanto física como económica. La escasez de agua física se refiere cuando en determinadas regiones no cuentan con los suficientes recursos hídricos para satisfacer la

demanda, incluyendo el agua que se utiliza para los ecosistemas. La escasez económica se debe a la falta de inversión en infraestructura o tecnología.

Existe agua potable para abastecer a los más de 7.000 millones de habitantes del planeta, sin embargo, hay una distribución desproporcionada, desperdicio, contaminación y una gestión insostenible, que conlleva al predominio de escasez de agua en determinadas zonas geográficas (Naciones Unidas, 2006).

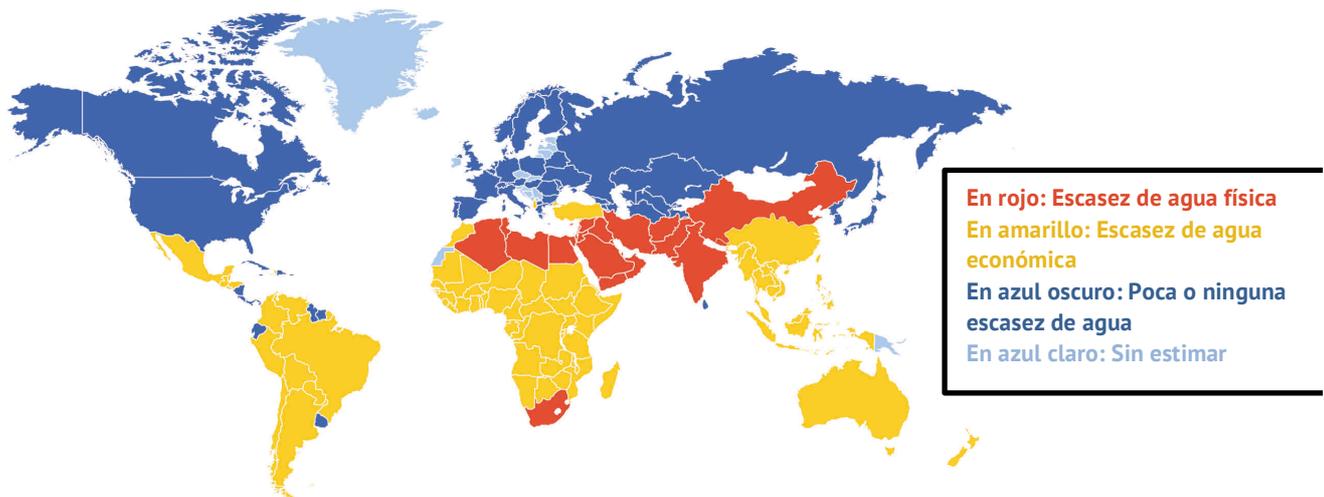


Figura 3.2. Escasez de agua en el mundo.

Respecto a la calidad del agua, uno de los problemas que tiene es que la cantidad de agua potable cada vez es menor ya que existe una alta contaminación en acuíferos, ríos y lagos. Esto se debe a diferentes causas, como son la eliminación de residuos peligrosos, desechos industriales, tratamientos de aguas residuales, desarrollo de cultivos intensivos o efectos naturales; que conllevan un deterioro en las aguas de consumo humano. Y el problema es que alrededor de un tercio de la población mundial obtiene agua potable de las reservas de agua subterránea.

En la Unión Europea la directiva 98/83/CE¹ establece valores máximos y mínimos para el contenido en minerales y diferentes iones como cloruro, fluoruro, nitrato, nitrito, amonio, calcio, magnesio, fosfato, arsénico, entre otros, además de los gérmenes patógenos. El pH del agua potable debe estar entre 6,5 y 9,5.

¹ Directiva 98/83/CE del Consejo de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano *Diario*

En concreto, tanto la Directiva 98/83/CE, como la Organización Mundial de la Salud (OMS), estiman que la máxima concentración aceptable para el fluoruro es de 1,5 mg/L. Y además en la legislación española, en el RD 140/2003, establece ese mismo valor como el límite propuesto para el fluoruro en los controles de calidad de agua de consumo humano.

Además, se estima que sobre un 10 % de la población se abastece de agua de acuíferos contaminada por arsénico y fluoruro. Esta contaminación en general se origina de forma natural, con la liberación al medio acuoso de contaminantes por mecanismos de disolución y/o desorción de los minerales de las rocas o sedimentos (Eawag, 2015)

3.2. Problemática del flúor en el agua.

El flúor es un elemento químico situado en el grupo de los halógenos, es un gas a temperatura ambiente. Es el elemento más electronegativo y reactivo de todos y forma compuestos, prácticamente, con el resto de elementos. Es el halógeno más abundante en la corteza terrestre. En el agua mar el flúor se encuentra, en forma de fluoruro, en una proporción de aproximadamente 1,3 ppm.

| Localización | ppm por peso |
|-------------------------|--------------|
| Universo | 0,4 |
| Sol | 0,5 |
| Rocas en la corteza | 540 |
| Agua de mar | 1,3 |
| Corrientes (Agua dulce) | 0,1 |
| Humano | 37 |

Tabla 3.1. Abundancia del flúor en diferentes entornos.

El flúor se encuentra como fluoruro, y este se produce a partir de la sellaita (MgF_2), fluorita (CaF_2), criolita (Na_3AlF_6) y otros muchos minerales. Estos minerales de flúor son casi insolubles en agua. Por lo tanto, estarán presentes en las aguas subterráneas sólo cuando las condiciones favorecen su disolución o provienen de efluentes industriales donde la concentración de fluoruro es alta y son descargados en cuerpos de agua.

La concentración de fluoruro en las aguas subterráneas depende de las condiciones químicas, físicas y geológicas del acuífero; además de la porosidad, la acidez del suelo y las rocas, la temperatura, la acción de otros elementos químicos y la profundidad de los pozos.

Por esta razón, en las aguas subterráneas las concentraciones de fluoruro pueden variar entre menos de 1 mg/L a más de 35 mg/L.

Aunque el fluoruro presenta efectos beneficiosos para la salud en concentraciones bajas, para concentraciones altas se ha demostrado que tiene efectos adversos, dando lugar a fluorosis dental, esquelética e incluso en casos muy agresivos daños neurológicos o cáncer. En la Tabla 3.2, se muestran estos efectos en la salud a distintas concentraciones de fluoruro.

| Concentración de fluoruro (mg/L) | Efecto en la salud |
|----------------------------------|-----------------------------|
| <0,5 | Caries dentales |
| 0,5 – 1,5 | Mejora la salud dental |
| 1,5-4 | Fluorosis dental |
| >4 | Fluorosis dental y ósea |
| >10 | Fluorosis ósea degenerativa |

Tabla 3.2. Efecto del fluoruro en la salud.

El fluoruro en el agua potable tiene un efecto sobre los dientes y huesos. Hasta un nivel pequeño (1-1,5 mg/L) fortalece el esmalte de los dientes. Las concentraciones en el rango de 1,5 hasta 4 mg/L dan lugar a fluorosis dental, mientras que con la exposición prolongada en concentraciones aún más altas la fluorosis dental progresa a la fluorosis esquelética. Como se comentaba en el párrafo anterior, existen muchas partes del mundo donde las concentraciones de fluoruro en las aguas subterráneas alcanzan, frecuentemente, 30 mg/L. En la figura 3.3, se puede observar las diferentes zonas afectadas.

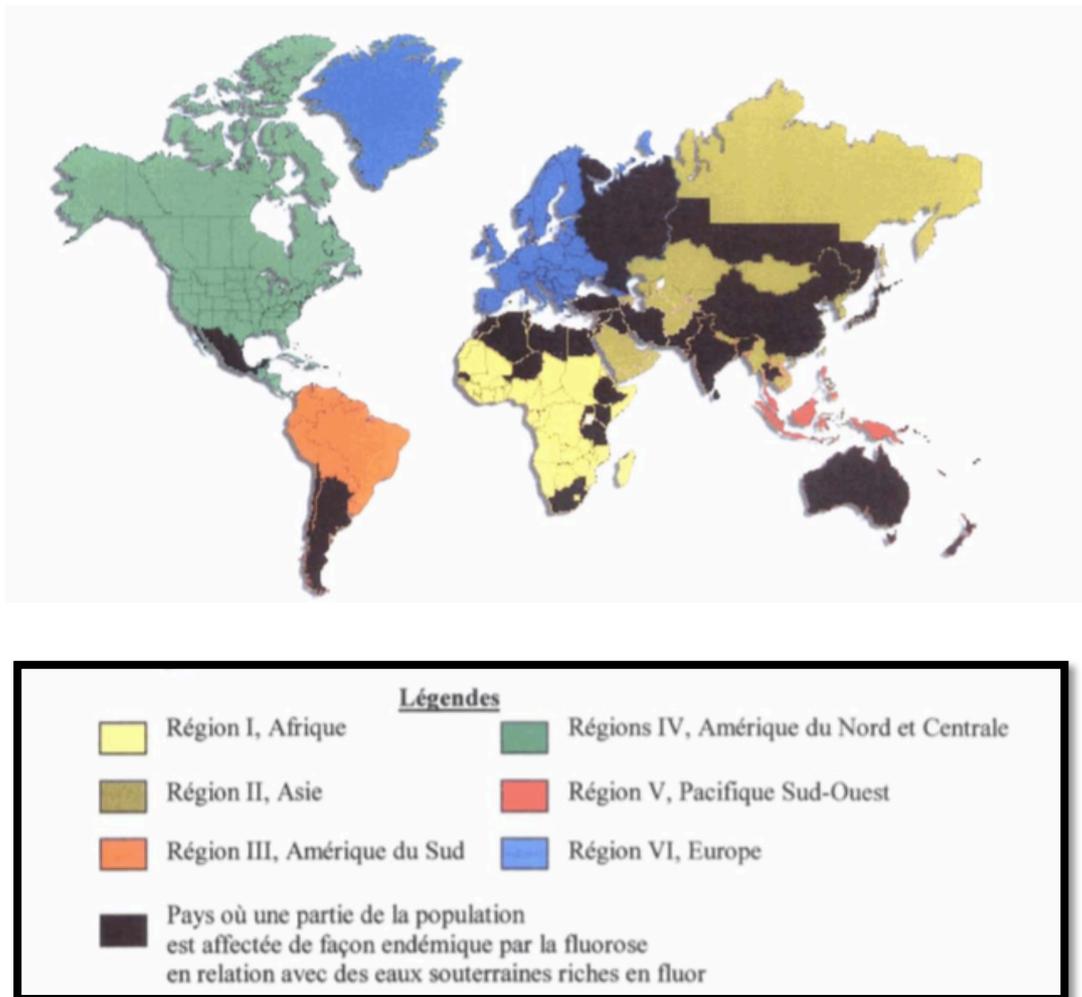


Figura 3.3. Regiones donde afecta la fluorosis.

La fluorosis dental es una enfermedad en la que el esmalte de los dientes se ve afectado y es causada por el exceso de consumo de fluoruro durante el periodo de desarrollo de los dientes, generalmente desde que se nace hasta que se cumplen los 6-8 años. Y luego está la fluorosis esquelética, que es una enfermedad que resulta de la acumulación excesiva de fluoruro en los huesos, lo que provoca cambios en la estructura de los huesos, haciéndolos extremadamente frágiles y quebradizos.

Como se indicaba en el apartado 3.1.1, se estima que sobre un 10% de la población se abastece de aguas subterráneas contaminadas por arsénico y fluoruro. El agua con alto contenido en fluoruro se encuentra mayoritariamente en el pie de las altas montañas, en áreas donde el mar ha hecho depósitos geológicos, y en los terrenos de origen volcánico como es el caso de Canarias.

3.2.1. El fluoruro en las aguas de Canarias.

Las Islas del Archipiélago Canario son de origen volcánico. El clima es subtropical oceánico y esto conlleva a que existen variaciones muy importantes respecto a las precipitaciones. En las islas orientales son más escasas que en las occidentales, así es el caso de Fuerteventura y Lanzarote que se caracterizan por un clima árido semidesértico. A diferencia de, por ejemplo, algunas zonas de La Palma, que las precipitaciones anuales llegan a superar los 1.200 mm año.

La escasez de lluvias en algunas zonas ha llevado a la instalación de desalinizadoras para abastecer zonas urbanas de agua potable o de consumo. La porosidad del terreno, dada su naturaleza volcánica, dificulta el aprovechamiento del agua de la lluvia en presas y embalses. En las islas occidentales se lleva a cabo un aprovechamiento subterráneo a través de galerías o pozos.

Al contrario de otras comunidades españolas, donde la concentración de fluoruro suele ser baja, en Canarias la situación es un tanto diferente. Debido a la complejidad y los diferentes tipos de abastecimiento de agua potable hace que las concentraciones de fluoruro sean muy variables entre dos poblaciones distintas.

El agua en Canarias es un bien preciado, y hasta los años 60 tuvieron que combatir la escasez de lluvia con las galerías. El crecimiento de la población y el aumento del nivel de vida, obligó a la instalación en Lanzarote, en 1965, de la primera desalinizadora de agua de mar de las islas, de España y de Europa, que producía en aquel entonces 2.500 m³/día de agua potable utilizando como proceso la evaporación súbita (Multi Stage Flash, MSF).

En las últimas décadas ha habido un incremento en el número de Estaciones Desalinizadoras, tanto con Agua de Mar (EDAM) como con Agua Salobre (EDAS) como se puede apreciar en la Tabla 3.3.

| Localización | Número de Plantas |
|---------------|-------------------|
| Gran Canaria | 137 |
| Lanzarote | 80 |
| Fuerteventura | 64 |
| Tenerife | 44 |
| El Hierro | 4 |
| La Gomera | 1 |
| La Palma | 0 |

Tabla 3.3. Número de plantas desalinizadoras en Canarias.

3.2.2. El fluoruro en la isla de Tenerife.

En Tenerife, los recursos subterráneos procedentes de galerías constituyen, aún, la principal fuente de suministro para cubrir el mantenimiento de la agricultura, principal consumidor de agua en la isla, y la demanda de abastecimiento urbano.

La zona noroeste de Tenerife, siempre ha tenido problemas de calidad de agua en su suministro urbano y en el agrícola. Las únicas fuentes de abastecimiento para las partes altas de la isla son las galerías que se introducen en el acuífero de Las Cañadas. Este acuífero está condicionado por la estructura y actividad volcánica del Teide, donde los gases disueltos, sobretodo el CO₂, producen elevadas concentraciones de sales disueltas en forma de bicarbonatos, sílice y fluoruros, siendo así un gran inconveniente para su uso como agua urbana y agrícola.

Cuando se empezó a tener información sobre este problema, se creía que estaba localizado en una zona puntual y por eso, incluso, se catalogaba de fluorosis endémica, pero debido al empeoramiento de la calidad de las aguas, ha empezado a ser un problema más generalizado.

Esto puede ser debido al agotamiento de los acuíferos por la sobreexplotación a la que han sido sometidos en las últimas décadas, el agua que se extrae es cada vez más antigua y, por tanto, ha estado más tiempo en contacto con las rocas pudiendo disolver más sales, entre ellas la fluorita (CaF₂), mineral que suele estar presente en terrenos volcánicos.

Además, al quedar menos volumen de agua, pero mantenerse el mismo aporte de gases volcánicos, la agresividad que estos le confieren al agua es aún mayor lo que facilita la interacción con la roca y que se disuelva más fluoruro.

Como se observa en la Figura 3.4, en la zona noroeste de la isla, en algunos municipios existe una restricción referida al consumo de agua de abasto municipal, ya que sus pozos y galerías tienen una alta contaminación de fluoruro. En las Tablas 3.4 (I) y 3.4 (II) se indican las concentraciones de fluoruro en las aguas potables de consumo público de Tenerife (1999-2001). Y a pesar de que estos datos sean relativamente antiguos, sirven para orientar de los valores actuales.

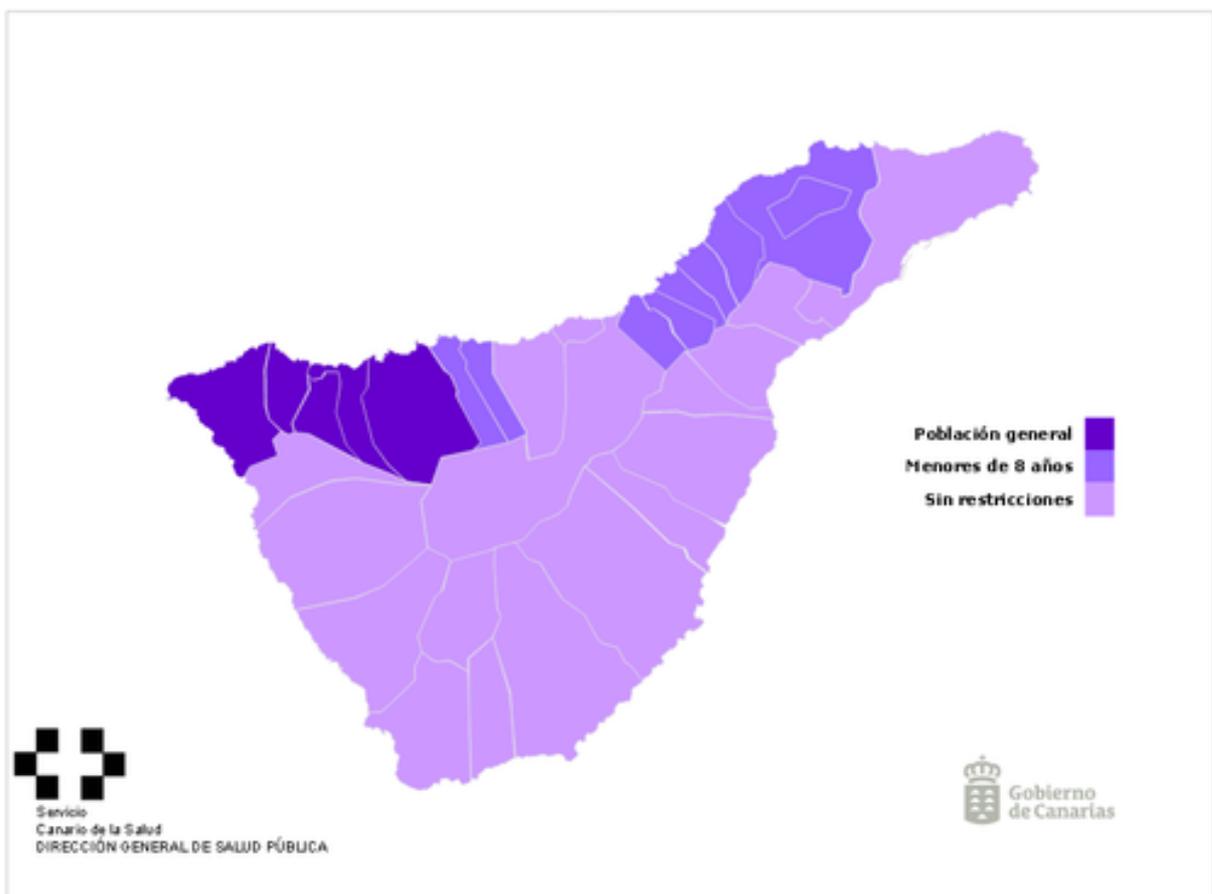


Figura 3.4. Municipios con restricción de uso del agua por superación del valor paramétrico de fluoruro en Tenerife.

Fuente: Servicio de Sanidad Ambiental. Dirección General de Salud Pública del Servicio Canario de la Salud (2004).

| Concentraciones de fluoruro (mg/l) en las aguas potables de consumo público de Tenerife (1999-2001). | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ADEJE más de 2,7 mg/l Armeñime La Caleta de Adeje Las Cancelas Iboybo El Puertito Ricasa</p> <p>entre 1,5 y 2,7 mg/l Adeje Callao Salvaje Las Moraditas Tijoco Bajo</p> <p>entre 0,7 y 1,5 mg/l Fañabé Playa de las Américas</p> <p>menos de 0,7 mg/l el resto de las entidades</p> <p>ARAFO menos de 0,7 mg/l todo el municipio</p> <p>ARICO entre 1,5 y 2,7 mg/l La Cisnera El Río</p> <p>entre 0,7 y 1,5 mg/l Arico Nuevo Arico Viejo Los Gavilanes San Miguel de Tajao Villa de Arico</p> <p>menos de 0,7 mg/l el resto de las entidades</p> | <p>ARONA menos de 0,7 mg/l todo el municipio</p> <p>BUENAVISTA DEL N. más de 2,7 mg/l Buenavista del Norte Las Canteras El Palmar Las Portelas Teno</p> <p>menos de 0,7 mg/l el resto de las entidades</p> <p>CANDELARIA menos de 0,7 mg/l todo el municipio</p> <p>FASNIA entre 0,7 y 1,5 mg/l todo el municipio</p> <p>GARACHICO más de 2,7 mg/l La Montañeta</p> <p>entre 1,5 y 2,7 mg/l Garachico Genovés El Guincho San Juan del Reparó</p> <p>entre 0,7 y 1,5 mg/l Caleta de Interián Las Cruces San Pedro de Daute</p> | <p>GRANADILLA entre 1,5 y 2,7 mg/l Los Blanquitos El Desierto</p> <p>entre 0,7 y 1,5 mg/l Charco del Pino Chimiche Granadilla de Abona El Salto</p> <p>menos de 0,7 mg/l el resto de las entidades</p> <p>LA GUANCHA más de 2,7 mg/l todo el municipio</p> <p>GUÍA DE ISORA entre 0,7 y 1,5 mg/l todo el municipio</p> <p>GÜÍMAR entre 0,7 y 1,5 mg/l Los Barrancos La Caleta Chimaje El Escobonal La Puente Puertito de Güímar El Tablado</p> <p>menos de 0,7 mg/l todas las entidades</p> <p>ICOD DE LOS VINOS entre 1,5 y 2,7 mg/l Buen Paso</p> <p>más de 2,7 mg/l el resto de las entidades</p> | <p>LA LAGUNA entre 0,7 y 1,5 mg/l Los Andenes Los Baldíos La Cuesta Las Chumberas Geneto Gracia Guajara Guamasa Jardina Las Mercedes Los Rodeos San Cristóbal de la Lag. San Lázaro Taco Los Valles Vega de Las Mercedes La Vega Lagunera</p> <p>menos de 0,7 mg/l el resto de las entidades</p> <p>LA MATANZA entre 1,5 y 2,7 mg/l todo el municipio</p> |

Tabla 3.4. (I) Concentraciones de fluoruro en las aguas potables de consumo público de Tenerife.

Fuente: "Flúor y fluorosis dental. Pautas para el consumo de dentífricos y aguas de bebida en Canarias". Gómez, G. (2002).

| Concentraciones de fluoruro (mg/l) en las aguas potables de consumo público de Tenerife (1999-2001). | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>LA OROTAVA entre 0,7 y 1,5 mg/l</p> <p>Las Arenas Benijos Las Candias Chasna Dehesa Baja El Durazno La Luz La Marzaga Montijos La Orotava La Perdoma Los Rechazos El Rincón San Antonio San Jerónimo San Miguel El Sauce</p> <p>menos de 0,7 mg/l el resto de las entidades</p> <p>PUERTO DE LA CRUZ entre 0,7 y 1,5 mg/l todo el municipio</p> <p>LOS REALEJOS más de 2,7 mg/l</p> <p>Paloblanco-Llanadas</p> <p>entre 1,5 y 2,7 mg/l</p> <p>Cruz Santa Montaña - Zamora Los Realejos</p> <p>entre 0,7 y 1,5 mg/l</p> <p>Icod el Alto Longuera - Toscal</p> <p>EL ROSARIO menos de 0,7 mg/l todo el municipio</p> <p>SAN JUAN DE LA RAMBLA más de 2,7 mg/l</p> <p>El Rosario San José La Vera</p> <p>entre 1,5 y 2,7 mg/l</p> <p>Las Aguas San Juan de la Rambla</p> | <p>SAN MIGUEL menos de 0,7 mg/l</p> <p>El Frontón</p> <p>entre 0,7 y 1,5 mg/l el resto de las entidades</p> <p>SANTA CRUZ DE TENERIFE menos de 0,7 mg/l todo el municipio</p> <p>SANTA ÚRSULA entre 0,7 y 1,5 mg/l</p> <p>El Cantillo La Corujera Cuesta de la Villa Farrobillo Santa Úrsula La Vera</p> <p>menos de 0,7 mg/l</p> <p>Tosca de Ana María</p> <p>SANTIAGO DEL TEIDE menos de 0,7 mg/l</p> <p>Puerto de Santiago</p> <p>entre 0,7 y 1,5 mg/l el resto de las entidades</p> <p>EL SAUZAL entre 1,5 y 2,7 mg/l</p> <p>Ravelo</p> <p>entre 0,7 y 1,5 mg/l</p> <p>El Sauzal</p> <p>LOS SILOS entre 0,7 y 1,5 mg/l</p> <p>La Caleta El Casco San Bernardo San José Tierra del Trigo</p> <p>más de 2,7 mg/l</p> <p>Erjos</p> <p>EL TANQUE entre 1,5 y 2,7 mg/l</p> <p>El Tanque</p> <p>más de 2,7 mg/l</p> <p>Erjos del Tanque Ruigómez San José de los Llanos</p> | <p>TACORONTE menos de 0,7 mg/l</p> <p>Campo de Golf La Caridad Juan Fernández Lomo Colorado El Pris Prismar San Juan Perales Tagoro</p> <p>entre 0,7 y 1,5 mg/l el resto de las entidades</p> <p>TEGUESTE menos de 0,7 mg/l todo el municipio</p> <p>LA VICTORIA DE ACENTEJO entre 1,5 y 2,7 mg/l</p> <p>Los Altos - Arroyos Bajos y Tagoro La Resbala La Vera - Carril</p> <p>entre 0,7 y 1,5 mg/l</p> <p>La Victoria de Acentejo</p> <p>VILAFLOR entre 0,7 y 1,5 mg/l</p> <p>La Escalona Jama</p> <p>menos de 0,7 mg/l</p> <p>Vilaflor</p> |

Tabla 3.4. (II) Concentraciones de fluoruro en las aguas potables de consumo público de Tenerife.

Fuente: "Flúor y fluorosis dental. Pautas para el consumo de dentífricos y aguas de bebida en Canarias". Gómez, G. (2002).

3.3. Soluciones a la problemática del fluoruro.

Para poder cumplir con la normativa vigente, en cuanto a concentración de fluoruro en el agua de abasto, existen varias opciones.

El hecho de que el fluoruro esté distribuido de forma irregular en aguas subterráneas y que su concentración se vaya modificando con el tiempo, implica que cada fuente tiene que ser probada de forma individual, siendo necesario realizar controles rutinarios, en el caso que una fuente determinada supere la concentración permitida, cambiar la fuente de abastecimiento. Cosa que no siempre es posible.

También se ha considerado mezclar el agua con alta concentración, con otra con poca cantidad de fluoruro. Pero esto no siempre es viable, puesto que a veces aunque se mezcle sigue superando la cantidad permitida por la normativa.

Y aunque beber agua embotellada sea una buena opción para el agua de consumo doméstico, no es factible para el sector agrícola de la isla, que además son los principales consumidores de agua de la isla.

A pesar de estas diferentes alternativas, se ha llegado a la conclusión que la mejor opción es eliminar el flúor del agua, mediante diferentes técnicas. Ya que es la única manera posible de erradicar este problema. Además, desde que se descubrió que el fluoruro es el principal culpable de la fluorosis, no se ha parado de hacer estudios experimentales utilizando diferentes técnicas, como:

-  Coagulación – Floculación.
-  Intercambio Iónico.
-  Adsorción.
-  Procesos con membranas.

3.3.1. Coagulación – Floculación.

La coagulación consiste en la adición de productos químicos al agua para desestabilizar los coloides en suspensión, reduciendo las fuerzas que tienden a mantenerlos separados.

Las prácticas convencionales de coagulación–floculación-sedimentación son un pretratamiento esencial para muchos sistemas de purificación de agua, especialmente para tratamientos de filtración. Estos procesos aglomeran los sólidos en suspensión para formar cuerpos de mayor tamaño a fin de que los procesos de filtración física puedan eliminarlos con mayor facilidad. La eliminación de partículas por medio de estos métodos hace mucho más eficaces los procesos de filtración.

Los coagulantes químicos, como sales de hierro, sales de aluminio o polímeros, se agregan al agua para facilitar la adherencia entre las partículas. Los coagulantes funcionan creando una reacción química y eliminando las cargas negativas que causan que las partículas se repelan entre sí. Esta neutralización de cargas se hace mediante una agitación violenta, con altas velocidades de mezclado. A continuación, la mezcla coagulante-agua se agita lentamente en un proceso que se conoce como floculación. Este agitado del agua induce que las partículas choquen entre sí y se aglutinen para formar grumos o “flóculos” que se pueden eliminar con mayor facilidad (Emamjomeh, M. M. y Sivakumar, M., 2006), bien por filtrado o sedimentación.

En la siguiente Figura 3.5 se puede observar gráficamente cómo funciona esta técnica.

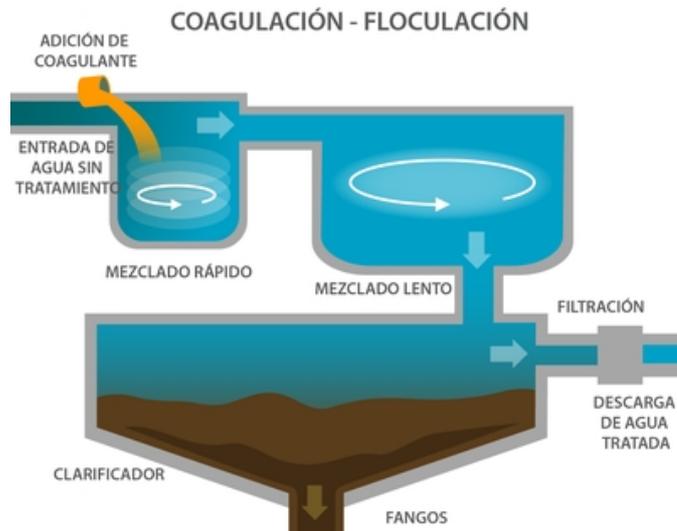


Figura 3.5. Esquema coagulación-floculación.

Inconvenientes, especialmente cuando se utilizan sales de aluminio:

- Aunque una parte del fluoruro se elimina en forma de precipitado, otra parte se convierte en fluoruro iónico, formándose un complejo soluble aluminio-ion fluoruro. El citado complejo es tóxico, de modo que no es muy aconsejable la adopción de la técnica en aguas de consumo humano.
- El costo de mantenimiento de la planta es muy alto. El proceso no es automático. Se requiere un empleado regular para la adición de productos químicos y el cuidado del proceso de tratamiento.
- Se requiere una zona amplia para el secado (tratamiento-eliminación) de los lodos.

3.3.2. Intercambio Iónico.

El fluoruro puede ser eliminado del agua con una resina de intercambio aniónico, que contiene grupos funcionales de amonio cuaternario, fuertemente básica.

Se produce una sustitución en la resina, de los iones cloruro, por parte de los fluoruros, ya que ocupan el sitio que los iones cloruro tienen en la misma, hasta que todos los sitios están ocupados. Llegado este momento, la resina se encuentra saturada, y es posible su regeneración mediante el lavado con una disolución sobresaturada de cloruro sódico, de modo

que el fluoruro al poseer mayor electronegatividad reacciona con el sodio, y el cloruro vuelve a ocupar su sitio en la resina.

Ventajas:

- Posee una eficacia en la eliminación de fluoruro del 90-95 %.
- No se alteran las propiedades incolora e insípida del agua.

Inconvenientes:

- La presencia de iones como el sulfato, carbonato, fosfato y la alcalinidad reducen la eficacia de la resina.
- Al realizar la regeneración de la resina, se obtiene un residuo rico en fluoruro, el cual debe tratarse posteriormente.

Debido al elevado coste de la resina, la regeneración de la misma, el tratamiento previo requerido para mantener el pH y la eliminación del residuo, supone un incremento económico que puede hacer no competitiva esta técnica.

3.3.3. Adsorción.

La adsorción es un proceso mediante el cual se produce la transferencia de materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase, generalmente sólida. La sustancia que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama "adsorbato" y la fase sólida se llama "adsorbente".

Se han probado muchos materiales adsorbentes con el objetivo de descubrir un agente de eliminación de fluoruro de forma eficiente y económica. Los adsorbentes más utilizados son la alúmina activa y el carbón activo, aunque éste último, se ha demostrado por estudios realizados por nuestro grupo de trabajo que no es muy efectivo para la eliminación de fluoruro.

La eficiencia de eliminación de fluoruro con la alúmina activada se ve afectada por la dureza, la carga superficial y la relación entre la concentración de fluoruro total a la dosis de alúmina activada. El cloruro parece no afectar a la capacidad de eliminación de fluoruro por la

alúmina activada. Para valores de $\text{pH} > 7$, los silicatos y los hidróxidos son fuertes competidores de los iones de fluoruro para los sitios de intercambio de alúmina activada; y para $\text{pH} < 5$, la alúmina activada se disuelve en medio ácido provocando la pérdida del medio de adsorción. Por lo que el pH debe estar entre 5,0 y 7,0.

Ventajas:

- El proceso puede eliminar el fluoruro hasta un 90%.
- El tratamiento es efectivo en cuanto al coste.

Inconvenientes:

- El proceso es altamente dependiente del pH y sólo funciona bien en un rango estrecho de pH (5,0 – 7,0).
- Una alta concentración de sales disueltas (TDS) puede provocar la contaminación del lecho de alúmina.
- Es necesario la regeneración del lecho, y la eficacia del adsorbente para la eliminación de fluoruro se reduce después de cada regeneración.
- También es un problema el tratamiento de los lodos de disolución regenerante cargada de fluoruro.

3.3.4. Procesos de membranas.

Los sistemas de membranas para el tratamiento de agua originalmente se usaron sólo en proyectos de desalinización. Pero las mejoras en la tecnología de membranas los ha convertido en una opción cada vez más popular para la eliminación de microorganismos, partículas y materiales orgánicos naturales que afectan el sabor del agua y enturbian su claridad.

Las membranas para el tratamiento del agua son láminas muy finas, inorgánicas u orgánicas que permiten separar los contaminantes según sus características como el tamaño o la carga eléctrica. El agua pasa a través de una membrana; pero dependiendo de su tamaño, las partículas, los microorganismos y otros contaminantes quedan separados.

Algunos de estos sistemas tienen como fuerza impulsora la presión, dependiendo de la presión del agua y de las características físico-químicas de las membranas para separar las partículas según su tamaño:

- La microfiltración (MF), utiliza el mayor tamaño de poro, y puede eliminar arena, limos, arcillas, algas, bacterias, etc.
- La ultrafiltración (UF), puede además eliminar virus.
- Los sistemas de nanofiltración (NF), proporcionan protección casi completa contra virus, eliminan la mayoría de contaminantes orgánicos, y pueden reducir la dureza del agua.
- Los sistemas de ósmosis inversa (OI), son membranas densas que eliminan casi todos los contaminantes inorgánicos y casi todo excepto las moléculas orgánicas de menor tamaño.
- La electrodialisis combina membranas de intercambio iónico con aplicación de una corriente eléctrica continua, para separar los iones según su carga eléctrica. En este caso las membranas que intervienen son permselectivas (membranas formadas por material de intercambio iónico), que teóricamente solo permiten el paso de aniones o cationes. Suelen ser competitivas en procesos de desalinización de aguas salobres.

Las membranas, especialmente las de **Ósmosis Inversa** y la **Nanofiltración**, pueden ser una buena opción para sistemas de tratamiento de agua en menor escala que enfrentan una amplia gama de contaminantes. Sin embargo, ellos producen a menudo mayores volúmenes de aguas de desecho (o “concentrado” o “rechazo”) que la mayoría de otros sistemas de tratamiento (hasta el 15 – 45% del volumen total de agua tratada) y pueden sufrir ensuciamiento tanto orgánico como inorgánico. Usualmente, el mantenimiento no es difícil, pero puede ser de alto costo dado que la primera acción necesaria consiste en reemplazar la membrana según sea necesario. Los problemas de mantenimiento tienden a involucrar membranas con fugas y contaminadas.

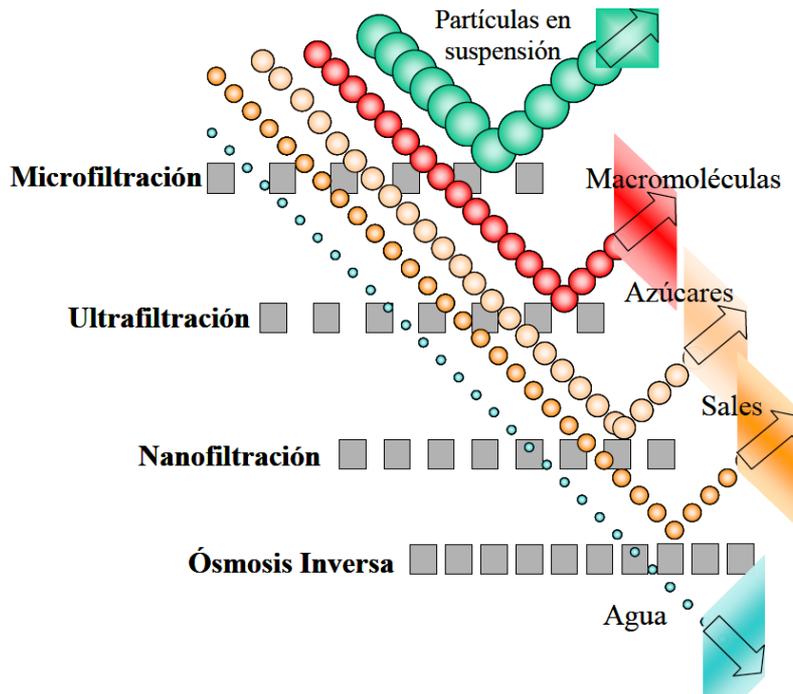


Figura 3.6. Grado de eliminación de Ósmosis inversa frente a otros.

3.4. Ósmosis Inversa.

Se entiende por ósmosis, el paso natural del agua a través de una membrana semipermeable, desde una disolución menos concentrada hacia una de mayor concentración por la acción de una diferencia de potencial químico. Esta diferencia de potencial químico, en el equilibrio, determina la presión osmótica.

La ósmosis inversa se produce cuando se ejerce presión hidráulica suficiente sobre la disolución concentrada para invertir el flujo osmótico normal. Al aplicar presión, el agua es forzada a pasar a través de la membrana semipermeable desde el lado más concentrado, hacia el lado menos concentrado, quedando retenidos en la membrana, por su tamaño, los iones, en general y en particular los iones fluoruro.

La eficiencia en la eliminación de F^- de los equipos de ósmosis inversa puede llegar al 98%, siendo su mayor problema el costo que origina la utilización de reactivos y la reposición de la membrana semipermeable (4 o 5 años de vida útil).

Para el funcionamiento de la planta de ósmosis se deben tener en cuenta como principales factores: la presión neta efectiva, la temperatura de operación, la calidad del afluente (en cuanto a su contenido de sales y fluoruro) y la presencia de oxidantes (como el cloro) que deterioran la membrana y obligan a un pretratamiento.

Además, debe considerarse el posterior tratamiento del agua que queda como disolución concentrada (rechazo) y que tiene altos contenidos de sales y de iones fluoruro.

Se puede concluir, por tanto, que el fundamento de la ósmosis inversa es aplicar a una solución salina una presión superior a la osmótica con el fin de forzar al agua a pasar a través de una membrana semipermeable, separándola así de las sales que contiene. En la Figura 3.7, se indica de forma gráfica lo mencionado.

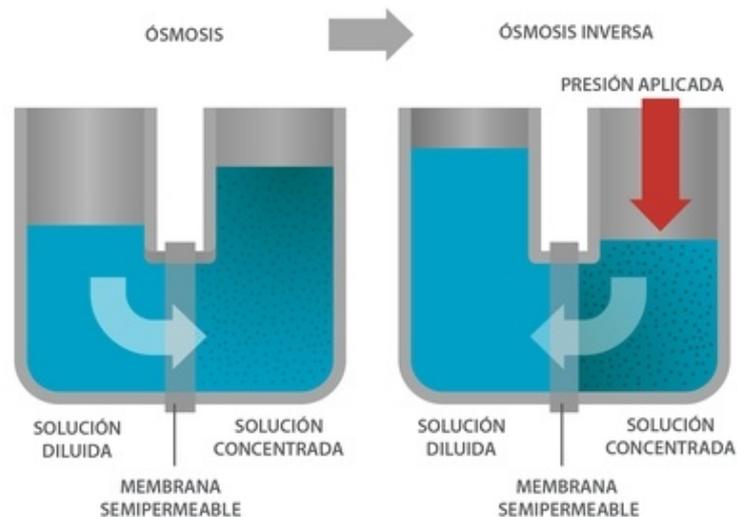


Figura 3.7. Esquema funcionamiento ósmosis inversa.

El esquema básico de una instalación de osmosis inversa se muestra en la Figura 3.8.

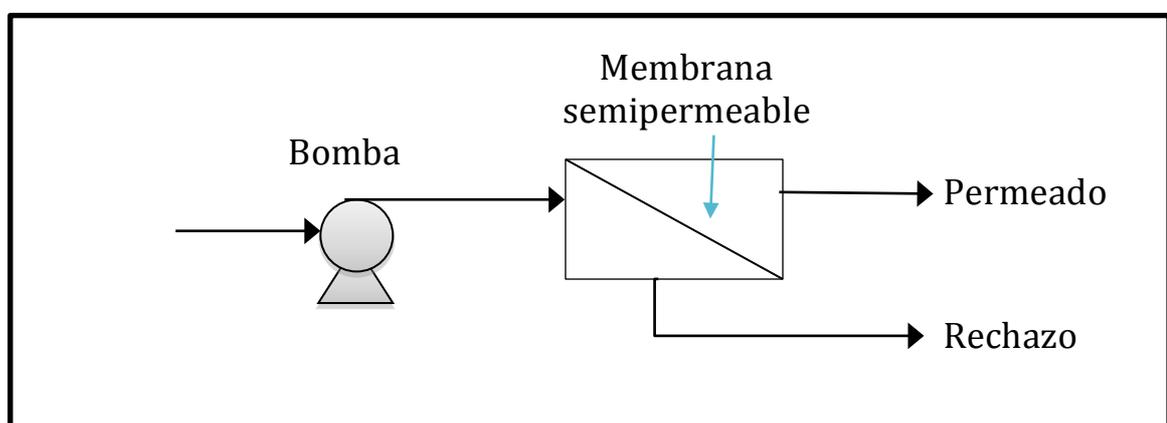


Figura 3.8. Esquema básico de una instalación de ósmosis inversa.

Una instalación de OI, se puede simplificar en las siguientes tres grandes áreas de proceso :

- Pretratamiento.
- Ósmosis inversa.
- Postratamiento.

A. Pretratamiento:

El agua que entra a los sistemas de ósmosis inversa requiere, normalmente, un pretratamiento para evitar el daño a la membrana por efecto de bacterias o sólidos suspendidos o poco solubles. El pretratamiento tiene como objetivo preservar el rendimiento y el tiempo de vida de las membranas, a través de la reducción de la suciedad, la contaminación biológica y de las incrustaciones. Por lo que, un pretratamiento inadecuado puede causar altos costes de limpieza y bajo rendimiento en el sistema.

Este proceso depende de la calidad del agua de alimentación y de las condiciones de operación. Requiere un análisis físico-químico completo del agua de alimentación. Este análisis se considera que es uno de los pasos más importantes en el diseño del sistema de ósmosis inversa general.

Las operaciones de pretratamiento se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Pretratamiento físico: es responsable de la filtración mecánica a través de rejillas, arena, cartuchos o filtración por membranas (UF o NF). Se puede eliminar y/o controlar parte de los iones y la materia coloidal contenida en el agua de entrada.
- Pretratamiento químico: incluye la adición de inhibidores de las incrustaciones, coagulantes, y desinfectantes. Es responsable del ajuste del pH, el aumento de la solubilidad de las sales y la desinfección.

B. Ósmosis Inversa:

Las membranas modernas son fabricadas de poliamidas aromáticas que tienen propiedades mecánicas y químicas más convenientes que los primeros diseños de acetato de celulosa. No obstante, en un principio se puede utilizar de dos tipos:

➤ Membranas de Celulosa:

Ventajas:

- Alta permeabilidad al agua.
- Elevado rechazo de sales: 90-95%.
- Tolerancia al cloro libre.

Inconvenientes:

- Éster no estable.
- Rango restringido de pH de trabajo: entre 4,5 y 7,5.
- Alta sensibilidad al ataque bacteriano.
- Riesgo de disolución por disolventes orgánicos.
- Aumento del paso sales con el tiempo.

➤ Membranas de Poliamida Aromática:

Ventajas:

- Elevado rechazo de sales.
- Ausencia de hidrólisis (pH entre 4 - 11).
- Insensibilidad al ataque bacteriano.
- Alta estabilidad química.

Inconvenientes:

- Baja permeabilidad al agua pura.
- Escasa tolerancia al cloro libre y oxidantes en general.

Las membranas de OI pueden ser usadas en cualquiera de los modos de filtración: frontal o flujo cruzado, este último modo es el más usado.

Las membranas se pueden clasificar atendiendo al módulo en que se configuran:

- Arrollamiento en espiral.
- Fibra hueca.
- Tubular.

- Fibra plana.
- Membrana de arrollamiento en espiral: Son capas sucesivas de membranas planas que se arrollan en torno a un tubo central perforado que recoge el permeado. En la Figura 3.9 se muestran sus características generales:
 - Gran superficie por unidad de volumen (600 a $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$).
 - Reducido coste de fabricación.
 - Cierta facilidad de limpieza.
 - No utilizable para líquidos con cierta turbidez.

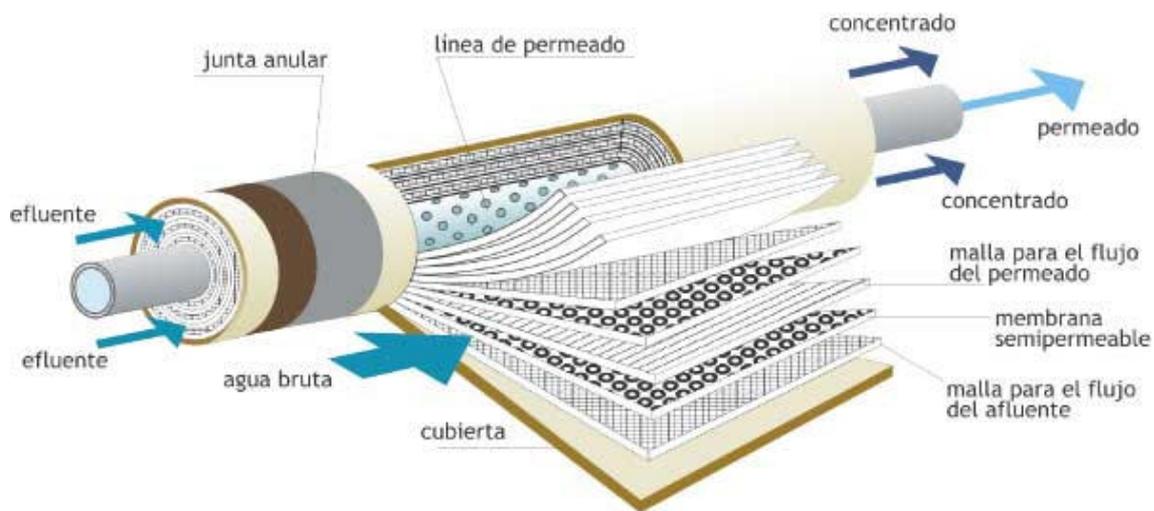


Figura 3.9. Esquema membrana de arrollamiento en espiral.

- Membrana de fibra hueca: Están formadas por pequeñas fibras de polímeros. Se muestra en la Figura 3.10. Sus características generales son:
 - Máxima superficie por unida de volumen ($6000 - 9000 \text{ m}^2/\text{m}^3$).
 - Propensa al ensuciamiento y no tiene una fácil limpieza.
 - Poliamida (una sola capa).
 - Coste superior al arrollamiento en espiral.

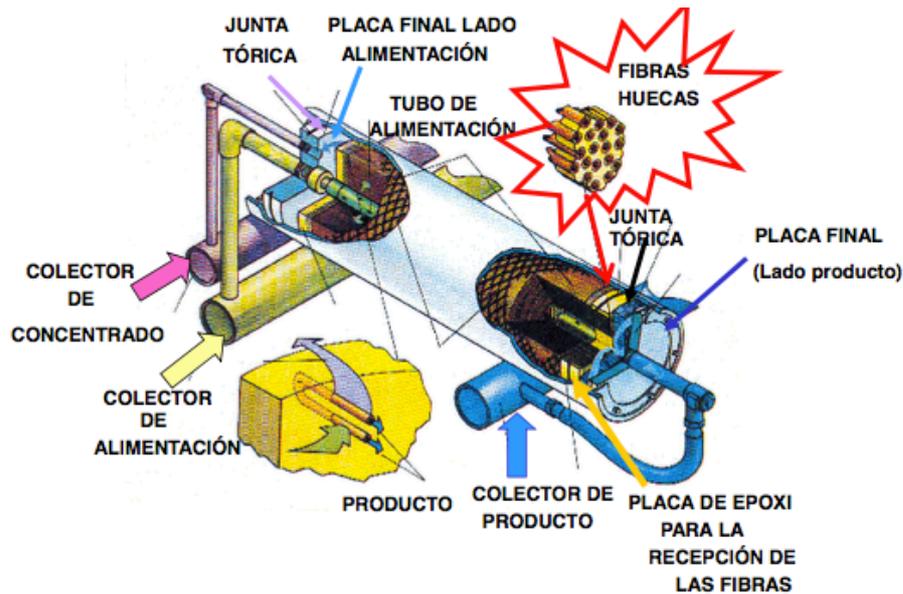


Figura 3.10. Esquema membrana de fibra hueca.

➤ Membrana tubular: Tubo poroso en cuya pared interior se deposita la capa activa. Puede usarse para líquidos con turbidez alta ya que es fácil de limpiar. Es muy utilizada en la industria alimentaria. Se muestran, en la Figura 3.11, sus características generales:

- Superficie de membrana por unidad de volumen reducida ($50 - 70 \text{ m}^2/\text{m}^3$).
- Fácil limpieza.
- Gastos de inversión más altos que los dos anteriores.
- Diámetro de tubo aproximadamente 25 mm.

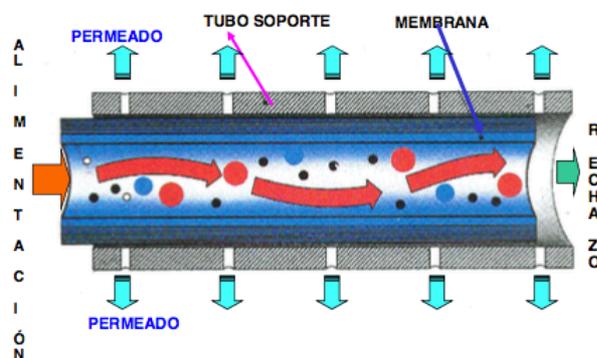


Figura 3.11. Esquema membrana tubular.

➤ Membrana de fibra plana: En este caso se sitúa sobre el exterior de platos porosos.

En la Figura 3.12 se presentan sus características:

- Baja relación superficie - volumen ($50 \text{ a } 100 \text{ m}^2/\text{m}^3$)
- Se suele emplear en industrias alimentarias
- Los gastos de operación son muy elevados cuando se utiliza a gran escala

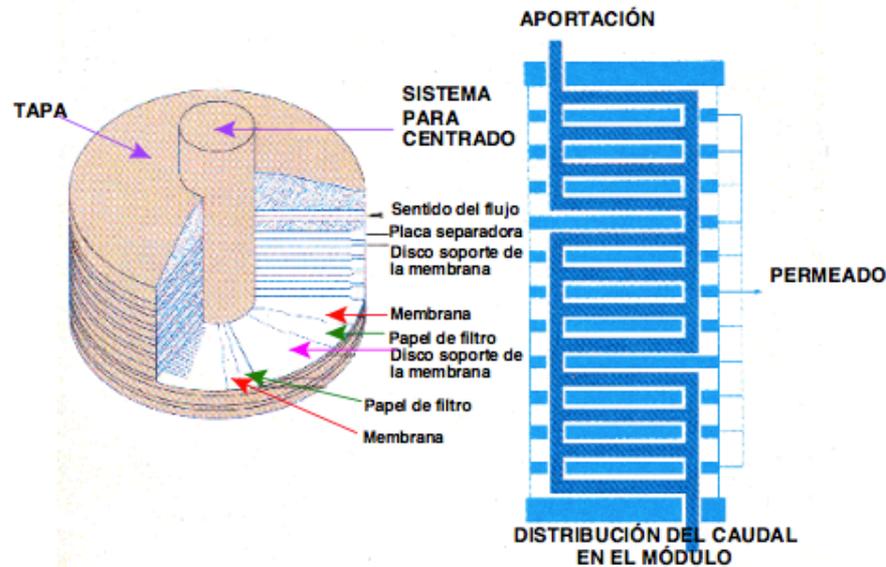


Figura 3.12. Esquema de membrana de fibra plana.

Las membranas más utilizadas son las de módulos de enrollamiento en espiral.

El flujo del fluido depende de las propiedades características de las membranas, tales como, la porosidad de la membrana, la fracción de volumen (espacio vacío que puede contener el líquido), la tortuosidad (distancia que debe viajar una molécula a través de la membrana dividido entre el espesor de la misma) y la difusión. La ecuación que relaciona estos parámetros es:

$$N_{Ax} = \frac{\rho_A k}{\mu} \frac{dP}{dx} - D_{AB} \frac{d\rho_A}{dx} \quad [\text{ec. 3.1}]$$

Donde N_{Ax} es el flujo de masa de A en la dirección del eje x (perpendicular a la superficie de la membrana); ρ_A es la densidad de masa de A; k es la permeabilidad; μ es la viscosidad; dP/dx es el gradiente de presión en la dirección del eje x; D_{AB} es el coeficiente de difusión binaria para la difusión de A en B.

El modelo que define el transporte llevado a cabo en las membranas de OI se denomina difusión por disolución.

Según este modelo, la expresión simplificada para el flujo de agua es:

$$N_A = L (\Delta P - \Delta \pi) \quad [\text{ec. 3.2}]$$

- N_A es el flujo de agua a través de la membrana, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.
- L es el coeficiente de permeabilidad, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.
- ΔP es la diferencia de presión hidrostática transmembrana, Pa.
- $\Delta \pi$ es la diferencia de presión osmótica entre el afluente y el permeado, Pa.

La permeabilidad de la membrana se puede calcular a través de la siguiente expresión:

$$\text{Permeabilidad} = \frac{Q_p}{A * P} \quad [\text{ec. 3.3}]$$

Siendo:

- Q_p = el caudal de permeado (en L/h)
- A = área efectiva de la membrana (m^2)
- P = presión de operación medida en bar.

También existe una relación entre la temperatura y la permeabilidad, ya que a medida que aumenta la temperatura, aumentan tanto la permeabilidad del agua como la de la sal. Los cambios de temperatura pueden tener un efecto general negativo o positivo en el sistema de ósmosis inversa.

En cuanto al ensuciamiento de la membrana, se presentan dos mecanismos por los que puede producirse:

- Suciedad superficial.
- Suciedad en los poros.

Sin embargo, las membranas de OI se dice que no tienen poros distinguibles y se considera que son esencialmente no porosas por lo que el principal motivo de ensuciamiento es la suciedad superficial. Puede producirse a través de una gran variedad de contaminantes

como son: partículas de materia en suspensión (orgánica o inorgánica), materia orgánica disuelta, materiales disueltos y sólidos disueltos. Además, el ensuciamiento se puede desarrollar de forma desigual a través de la membrana.

La capacidad que posee un agua para ensuciar una membrana de OI se suele describir usando el índice de ensuciamiento coloidal (SDI, Silt Density Index). Se determina a partir de la tasa de ensuciamiento de un filtro de 0,45 micras, a una presión de 207 kPa y se describe en el método estándar ASTM D4189 (ASTM, 2007). La ecuación es la siguiente:

$$SDI = 100 * \frac{1 - (t_1/t_2)}{t} \quad [\text{ec. 3.4}]$$

Donde t es el tiempo de flujo total transcurrido entre las medidas 1 y 2, y t_1 y t_2 son los tiempos (en segundos) que se requieren para filtrar 500 ml de agua inicialmente y después de t minutos, respectivamente.

El problema fundamental del ensuciamiento de los sistemas de OI con agua salobre es la precipitación de sales y la incrustación en la membrana.

Otros parámetros importantes a tener en cuenta cuando se usa un equipo de ósmosis inversa son: la dureza del agua y el grado de recuperación denominado “recovery”.

- Dureza del Agua

Se define la dureza total del agua como la cantidad de sales de elementos alcalinotérreos (berilio, magnesio, calcio, estroncio, bario y radio) presentes en el agua y que normalmente se asocia a la formación de incrustaciones calcáreas. Si bien el concepto de dureza incluye diversos elementos, en la práctica, la dureza de un agua se corresponde únicamente con la cantidad de calcio y magnesio existentes.

En este sentido, destaca la importancia del magnesio en la formación de incrustaciones calcáreas ya que habitualmente se tiende a asociar las incrustaciones (cal) únicamente con el calcio presente en el agua, y generalmente todas las incrustaciones están constituidas por sales tanto de calcio como de magnesio.

Cuando en el agua, además de los iones calcio y magnesio, también están presentes los iones bicarbonato, pueden producirse incrustaciones calcáreas. El aumento de la temperatura y un valor de pH elevado favorecen, asimismo, la formación de las mismas.

Uno de los índices más comunes que se emplean es el Índice de Saturación de Langelier (LSI, Langelier Saturation Index). Es uno de los sistemas más utilizados y está citado en el Real Decreto 140/2003 sobre la calidad del agua de consumo humano. Se basa en el cálculo del valor del pH de saturación o de equilibrio (pH_s), el cual, comparado con el pH real del agua (pH), permite determinar el carácter del agua.

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pH}_s \quad [\text{ec. 3.5}]$$

Existen programas que, en función de ciertos parámetros, obtienen el LSI dando una idea de la dureza del agua en estudio. Uno de ellos lo proporciona Lenntech, consistente en una calculadora telemática donde, para obtener el LSI, se deben introducir los siguientes datos:

- pH
- Conductividad en SDT
- $[\text{Ca}^{2+}]$ (ppm)
- $[\text{HCO}_3^-]$ (ppm)
- Temperatura del agua (°C)

A través de este programa, se puede obtener el valor del LSI y del pH_s. Según el valor del Índice de Langelier, se puede definir el tipo de agua con la que se está trabajando. En las Tablas 3.5 y 3.6 se muestran los posibles resultados de dicho programa.

| LSI | Indicación |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LSI<0 | Agua no saturada con respecto a carbonato cálcico (CaCO ₃). El agua no saturada posee la tendencia de eliminar láminas de carbonato cálcico (CaCO ₃) presentes que protegen las tuberías y equipos. |
| LSI=0 | Agua considerada neutra. No existe formación de incrustaciones ni eliminación de las mismas. |
| LSI>0 | Agua supersaturada con respecto a carbonato cálcico (CaCO ₃). Posible formación de incrustaciones. |

Tabla 3.5. Tabla de Índice de Langelier.

| LSI (Carrier) | Indicación |
|----------------------------|-----------------------------------------------------|
| $-2,0 < \text{LSI} < -0,5$ | Corrosión severa |
| $-0,5 < \text{LSI} < 0$ | Corrosión leve pero sin formación de incrustaciones |
| $\text{LSI} = 0,0$ | Equilibrada pero posible corrosión leve |
| $0,0 < \text{LSI} < 0,5$ | Formación leve de incrustaciones y corrosiva |
| $0,5 < \text{LSI} < 2$ | Formación de incrustaciones pero no corrosiva |

Tabla 3.6. Tabla de Índice de Langelier mejorada por Carrier.

- Recovery

El recovery o grado de recuperación (Y) se suele expresar como porcentaje y es un indicador importante de la aplicación de la OI viene dado por la relación entre el caudal volumétrico de permeado y el caudal volumétrico total o caudal de alimentación (que se puede calcular como la suma del caudal de permeado y rechazo).

$$Y (\%) = \frac{Q_p}{Q_r} * 100 \text{ [ec. 3.6]}$$

Donde Q_p es el caudal volumétrico de permeado (L/h) y Q_r el caudal volumétrico total (L/h).

El grado de recuperación o recovery empleando sistemas de ósmosis inversa varía entre el 35% y el 85%, dependiendo directamente de la composición del agua de alimentación, la salinidad del agua de alimentación, el tratamiento previo, las opciones de eliminación del concentrado y la configuración del diseño óptimo de energía.

C. Postratamiento.

Debido al hecho de que el permeado de OI tiene niveles extremadamente bajos de sales disueltas (en particular, de calcio y bicarbonato), a menudo es tratado antes de la

distribución. El postratamiento generalmente implica mezclar la corriente de permeado con otra corriente para aumentar la salinidad, o bien utilizar un lecho de piedra caliza (CaCO_3), lechada de cal (Ca(OH)_2) o disolución de sosa cáustica (NaOH) para aumentar la dureza, la alcalinidad, pH, y para provocar la formación de bicarbonato de calcio, lo que reduce los problemas de corrosión en el sistema de distribución de agua.

Además, el permeado contiene una gran cantidad de dióxido de carbono disuelto, que debe ser eliminado, ya que puede ser transformado en ácido carbónico, dando agua corrosiva. En algunas ocasiones se emplea un descarbonatador para eliminar el CO_2 , seguido de una mezcla con el oxígeno para mejorar el sabor del agua.

El agua procedente de un sistema de ósmosis inversa no sería necesario desinfectarla ya que las membranas son capaces de bloquear las bacterias y los virus, pero debido a la existencia de las muchas uniones y conexiones son posibles fuentes de contaminación y, en consecuencia, se pueden encontrar en el agua producida organismos patógenos. Por lo tanto, la desinfección utilizando un agente químico (adición de gas de cloro o hipoclorito de sodio o de calcio) se debería llevar a cabo.

Las condiciones alcalinas en el lado del rechazo pueden causar la precipitación de sales. El agua rechazada puede requerir, en su caso, tratamiento especial.

Ventajas de la ósmosis inversa:

- Tiene un consumo energético menor comparado con otras tecnologías como la destilación y la electrodiálisis (en el caso de agua de mar).
- Se puede utilizar tanto en agua salobre como de mar
- Cuando se evalúa la ósmosis contra los procesos de evaporación, hay que tener en cuenta que la OI de agua salobre, utilizando membranas de baja presión, logra tener un consumo de energía de 1 a 1,5 kWh/m³, y la ósmosis de agua de mar con recuperación de energía tiene un consumo de energía eléctrica de 3 a 4 kWh/m³. Sin embargo, la evaporación tiene un consumo de energía total de unos 15 kWh/m³ de producto.
- La inversión está muy ligada a las características del agua que se pretende desalinizar y, en general, es inferior a la de los otros sistemas.
- Precisa una extensión de terreno de tipo medio.
- Además de iones, separa bacterias y virus, por lo que también tiene aplicaciones como sistemas de desinfección.

- El proceso no se perturba de forma grave por cambios moderados en la salinidad del agua, como puede suceder en la intrusión marina en el acuífero.
- Incurriendo en los mismos costes, la OI puede reducir el contenido de sales de agua por un factor de 100, a diferencia de la electrodiálisis que sólo lo hace en un factor de 4 veces.

Desventajas de la ósmosis inversa:

- Su manejo se complica en función de las características físico-químicas del agua.
- Necesita una fuente exterior de energía.
- La presencia de iones específicos limita sus posibilidades de aplicación eficiente.
- Las principales desventajas de la ósmosis inversa son la lentitud del flujo y la cantidad de líquido que se desperdicia.
- Precisa tratamientos físico-químicos que a veces pueden ser importantes.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4. Materiales y Métodos.

4.1 Instalación experimental.

En la realización de este estudio se ha utilizado siempre el mismo montaje, con membranas de ósmosis inversa, con diferentes tipos de alimentación: disoluciones sintéticas o aguas reales con diferentes concentraciones iónicas.

4.1.1 Instalación para experimentos de una etapa.

En esta caso, para verificar el comportamiento de la membrana, se utilizan disoluciones preparadas con agua desionizada y NaF, con concentraciones de fluoruro similares a las que tendría el agua de abasto municipal.

Un diagrama de la instalación se muestra en la Figura 4.1 y una fotografía en la Figura 4.2.

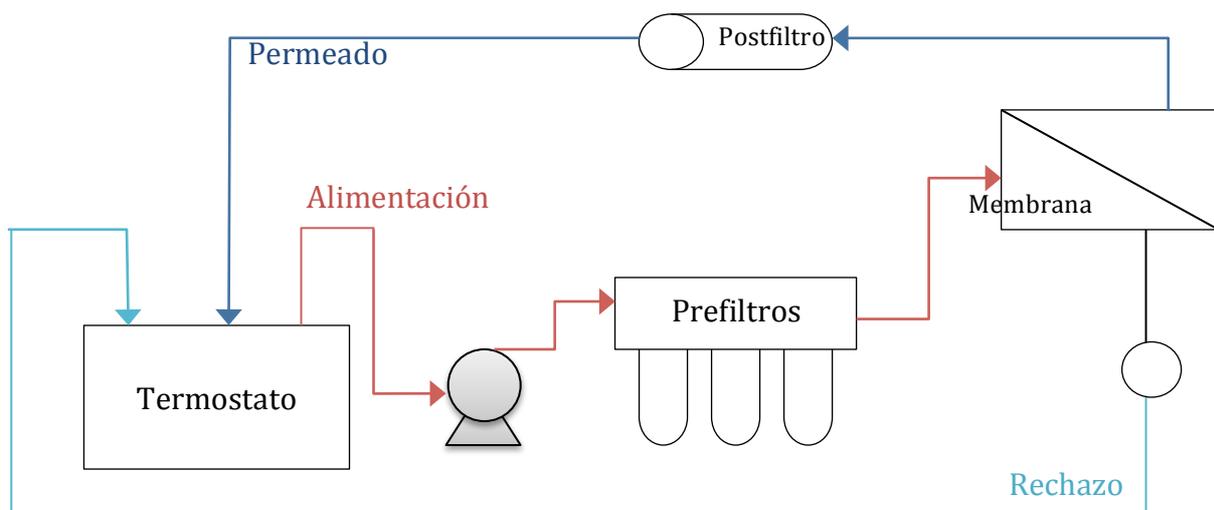


Figura 4.1. Esquema de la instalación. Circuito cerrado y continuo.

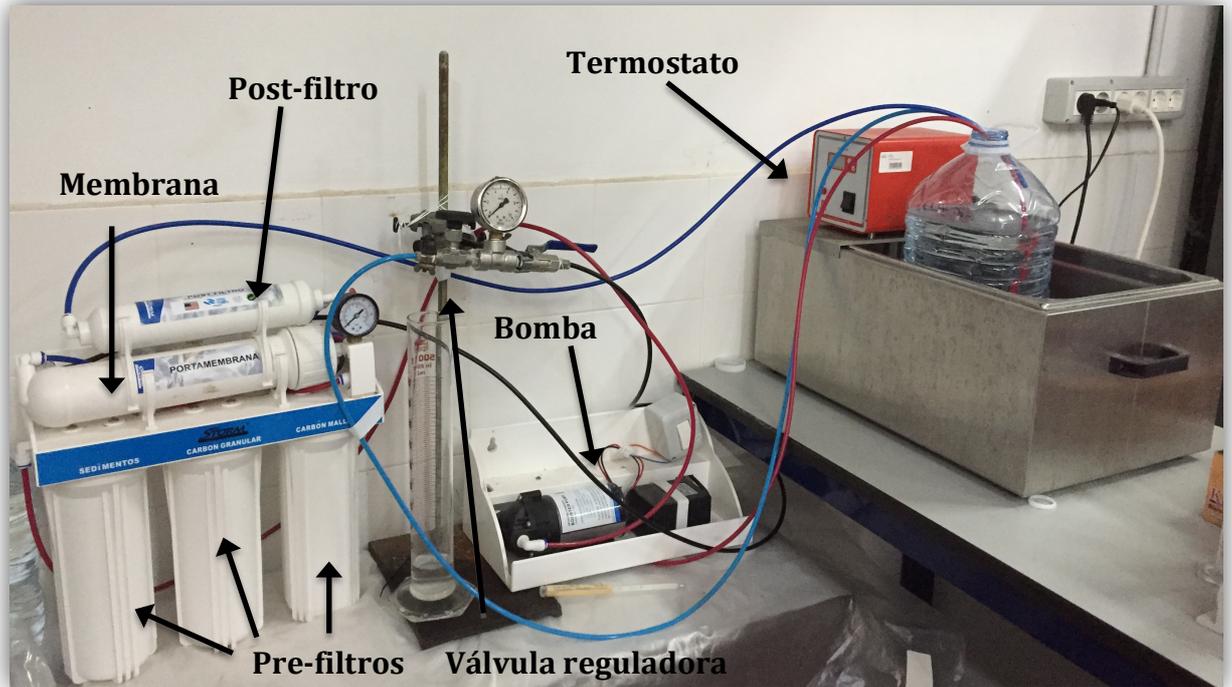


Figura 4.2. Montaje de la instalación.

Leyenda:

- Tubería de alimentación
- Tubería de permeado
- Tubería de rechazo (antes del manómetro)
- Tubería de rechazo (después del manómetro)

En esta instalación se han empleado los siguientes equipos:

- Termostato
- Bomba
- Prefiltros
- Membrana
- Portamembrana
- Postmembrana

A continuación se explican detalladamente:

➤ Termostato:

Para mantener una temperatura de operación constante a 25 °C se ha utilizado el termostato que se muestra en la Figura 4.3.

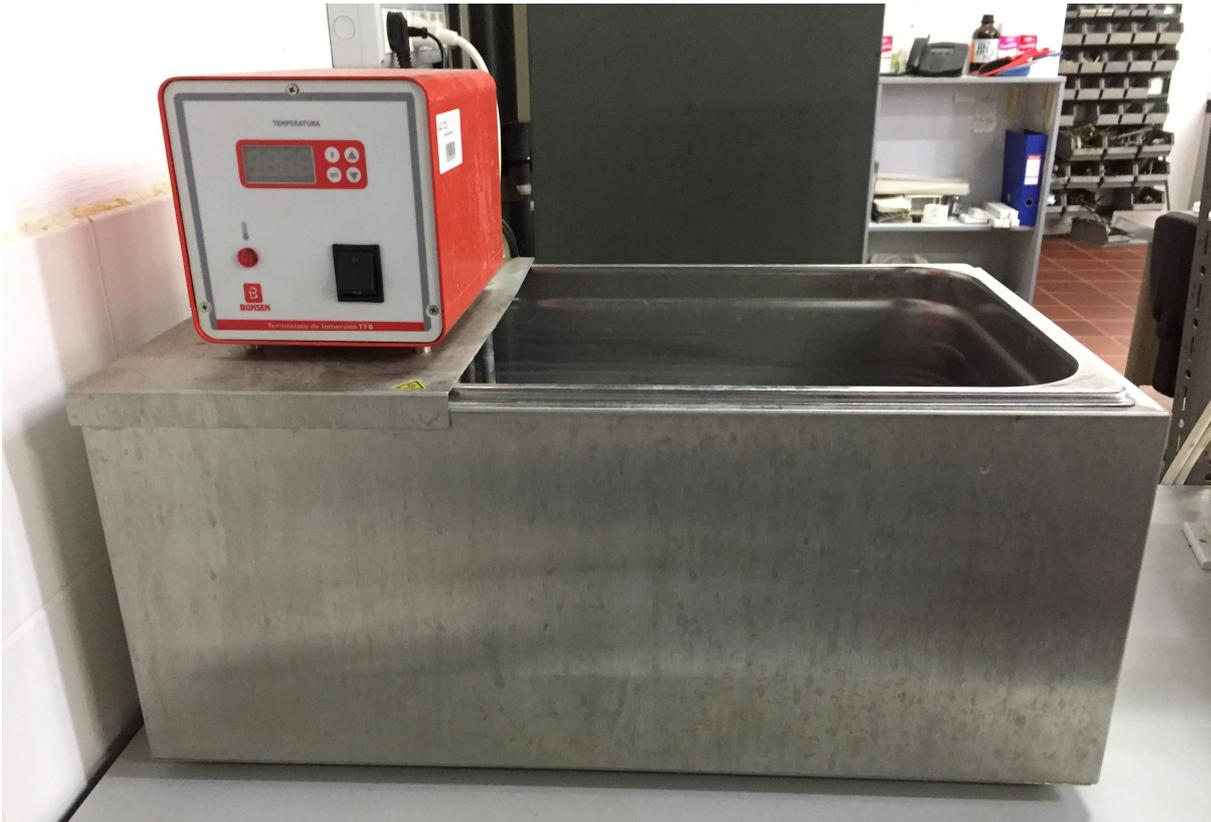


Figura 4.3. Termostato.

➤ Bomba

Es una bomba booster (aceleradora), con transformador de 24 V, que nos permite trabajar hasta una presión máxima de 4 bar.



Figura 4.4. Bomba para equipos de ósmosis inversa.

Las características técnicas dadas por el fabricante se muestran en la Tabla 4.1.

| | Bomba |
|-------------------|---------------------|
| Marca | HFL |
| Modelo | BOOSTER PUMP50G-75G |
| Caudal bombeo | 0,6 - 0,8 l/min |
| Consumo trabajo | 0,65 A |
| Consumo pico máx. | 1,2 A |
| Voltaje | 24 V |

Tabla 4.1. Características técnicas de la bomba.

➤ Prefiltros

La unidad cuenta con 3 prefiltros de 10", se colocan en el siguiente orden según el paso del agua:

- Filtro de sedimentos: cartucho de polipropileno que retiene las partículas en suspensión del agua superiores a 5 micras: arena, piedras, etc.
- Filtro de carbón granular: elimina el cloro del agua, componentes orgánicos, metales pesados, herbicidas y pesticidas.
- Filtro de carbón activo de malla (carbón block): prefiltración del agua para la protección de la membrana. Elimina olores y sabores, y mejora la calidad del agua.



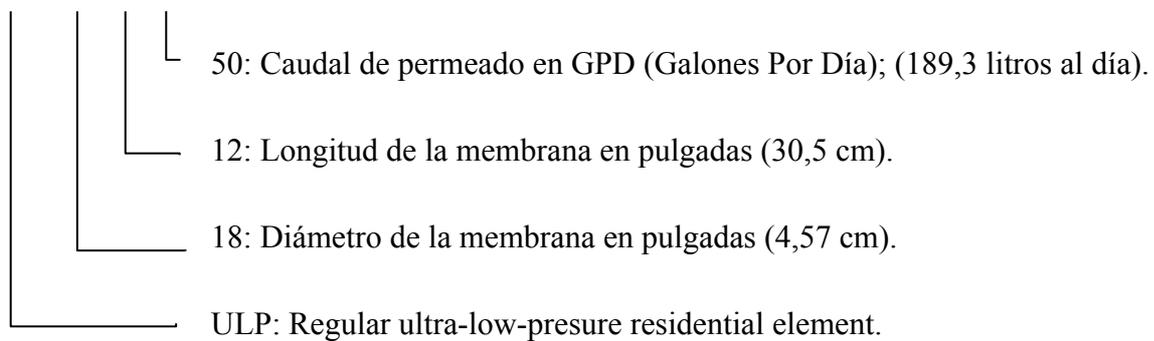
Figura 4.5. Prefiltros para ósmosis inversa.

➤ Membrana

La membrana empleada es una membrana VONTRON® de arrollamiento en espiral para ósmosis inversa. Está fabricada con poliamida. Concretamente la empleada es, la ULP1812-50.

La nomenclatura de la membrana se refiere a:

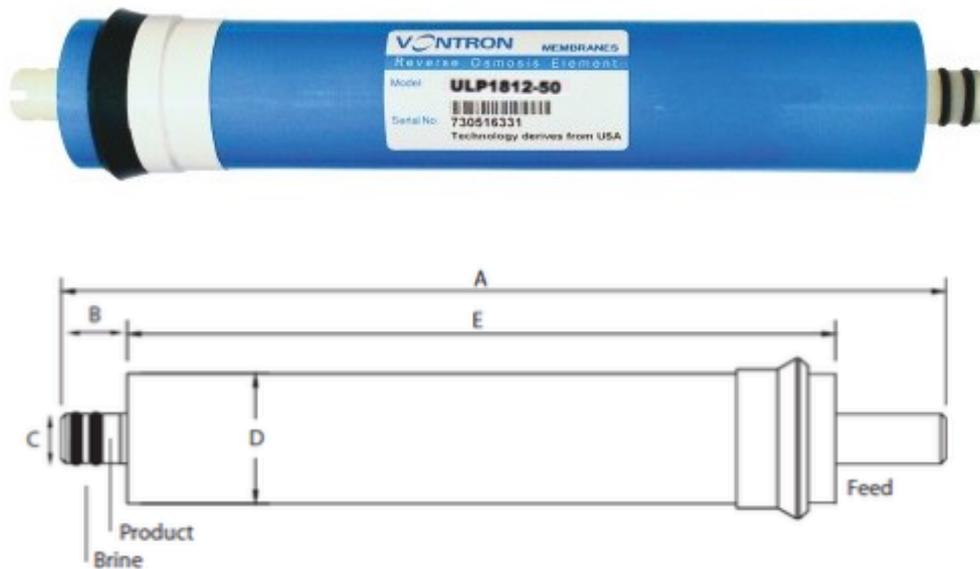
ULP 18 12 - 50



Las características principales de la membrana se muestran en la Tabla 4.2 y Figura 4.6.

| Membrana VONTRON® | |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Modelo | ULP1812-50 |
| Capacidad máxima de filtración | 50 GPD (189,3 l/día) |
| Capacidad de separación de sustancias | 0,0001 micras |
| Área efectiva de la membrana | 0,41 m ² |
| Rechazo de sales | 98% |
| Campos de aplicación | Para bajas presiones en purificadores de agua residenciales, hospitales y laboratorios; para aguas con menos de 500 ppm de total de sólidos disueltos |

Tabla 4.2. Características de la membrana en estudio.



| A | | B | | C | | D | | E | |
|-------|------|-------|------|-------|---------|-------|------|-------|------|
| (inc) | (mm) | (inc) | (mm) | (inc) | ((mm).) | (inc) | (mm) | (inc) | (mm) |
| 11.74 | 298 | 1.17 | 30 | 0.68 | 17 | 1.75 | 44.5 | 9.4 | 239 |

Figura 4.6. Membrana VONTRON® de ósmosis inversa y sus dimensiones.

➤ Portamembrana

Recipiente cilíndrico de dimensiones normalizadas en cuyo interior se sitúa la membrana de ósmosis inversa. Está fabricado de PVC y soporta perfectamente las condiciones de trabajo.



Figura 4.7. Portamembrana de ósmosis inversa.

➤ Postfiltro

El post-filtro es de carbón activo y se sitúa a la salida del permeado con la finalidad de mejorar el sabor, el olor y regular el pH del agua.



Figura 4.8. Postfiltro para membrana de ósmosis inversa.

2.1.2. Disoluciones de NaF.

Las disoluciones de fluoruro sódico se han preparado mediante pesada y análisis posterior. Las concentraciones se encuentran entre 2,5 y 7,5 de F^- , según el caso.

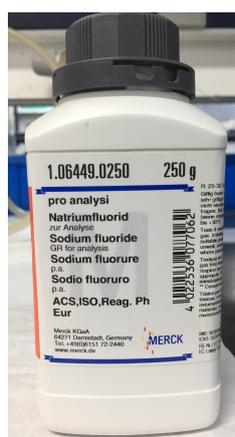


Figura 4.9. Fluoruro Sódico marca Merck.

2.1.5. Instalación para experimentos de varias etapas.

Finalmente se decidió simular una instalación de varias etapas con objeto de aumentar el recovery. En este caso, el esquema empleado se muestra en la Figura 4.10. A pesar de que en la misma se representan sólo dos etapas, se repetirá ese procedimiento hasta alcanzar un recovery del 75-80% aproximadamente, añadiendo todas las etapas que sean necesarias.

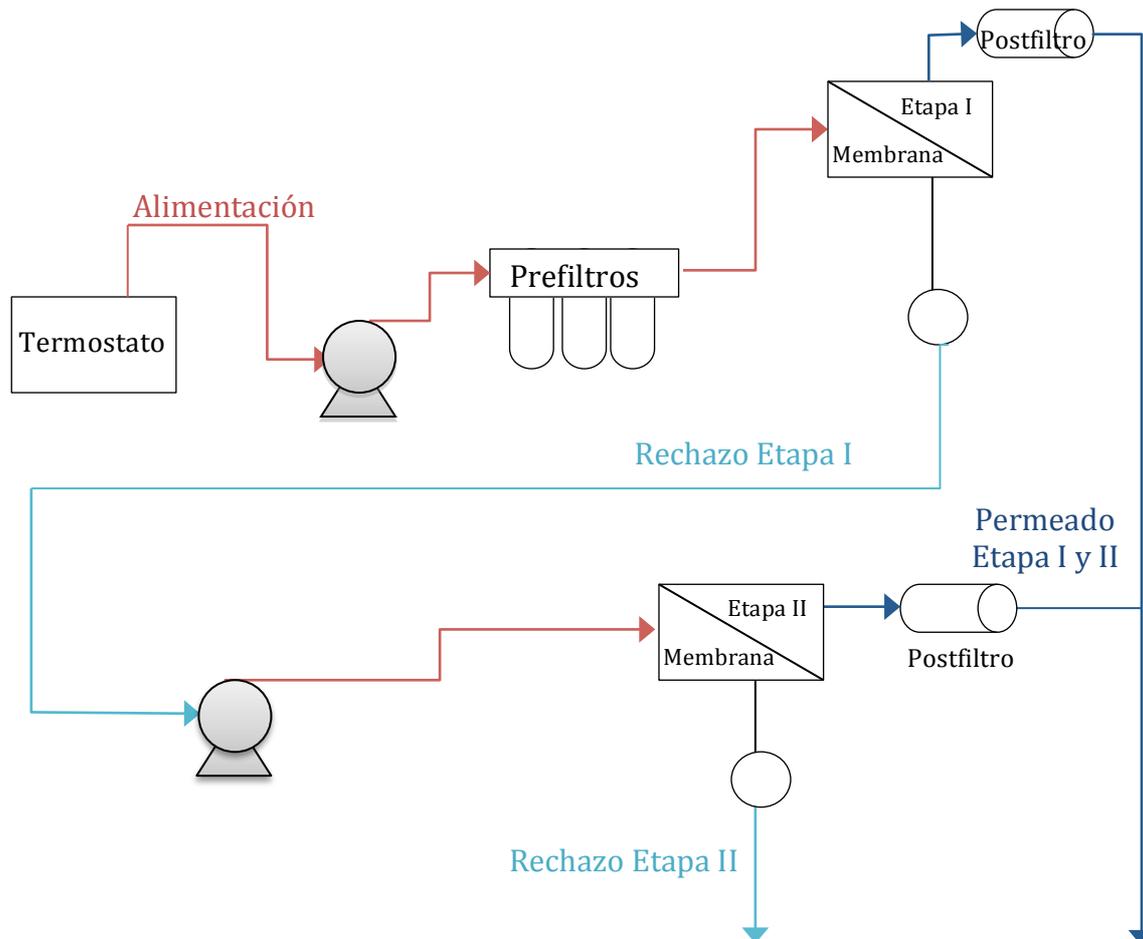


Figura 4.10. Esquema de la instalación de varias etapas.

La alimentación se hizo pasar a través de la primera etapa trabajando en circuito abierto y recogiendo el permeado y el rechazo en recipientes diferentes. Una vez finalizada esta parte, se introdujo el rechazo de la primera etapa en el termostato y se puso de nuevo en funcionamiento en circuito abierto, recogiendo el permeado y rechazo de la segunda etapa en recipientes diferentes. Y así hasta conseguir el recovery necesario o hasta obtener un permeado con una concentración de fluoruro igual o superior a 1,5 mg/L.

4.2. Métodos analíticos.

4.2.1 Cromatografía Iónica.

La cromatografía de intercambio iónico (o cromatografía iónica) es un proceso que permite la separación de iones y moléculas polares basado en las propiedades de carga de las moléculas. Puede ser usada en casi cualquier tipo de molécula cargada, incluyendo grandes proteínas, pequeños nucleótidos y aminoácidos. La disolución que debe inyectarse es usualmente llamada "muestra" y los componentes separados individualmente son llamados analitos. Es usada a menudo en purificación de proteínas, análisis de agua o control de calidad.

El cromatógrafo empleado es el METROHM® Professional IC 882. Está formado principalmente por una bomba iPump, una columna de separación analítica iColumn (que varía dependiendo de si se analizan aniones o cationes) y un detector de conductividad inteligente iDetector que transmite la señal analítica al software MagIC Net™ directamente y sin interferencias, gracias al procesamiento digital de señales



Figura 4.11. Cromatógrafo iónico METROHM® Professional IC 882.

Este cromatógrafo opera con el software de cromatografía MagIC Net™ que controla todos los componentes del sistema y supervisa los parámetros esenciales del análisis.

Sus características principales son:

- Cromatografía iónica inteligente
- Análisis de rutina que satisfacen altas exigencias, en las gamas de:
 $\mu\text{g/L}$ – mg/L – %
- Límites de detección $< 1 \mu\text{g/L}$
- Construcción compacta, ahorrando espacio
- Excelente relación calidad-precio
- Cumple con las exigencias de GLP y de FDA
- Componentes inteligentes: iPump, iDetector, iColumn
- Software MagIC Net™ para el control del sistema
- Amplias funciones de supervisión y control
- Posibilidad de total automatización

Los aniones a medir en el cromatógrafo iónico son:

- Fluoruro [F^-]
- Cloruro [Cl^-]
- Bromuro [Br^-]
- Nitrato [NO_3^-]
- Fosfato [PO_4^{3-}]
- Sulfato [SO_4^{2-}]

Y los cationes a medir en el cromatógrafo iónico son:

- Sodio [Na^+]
- Amonio [NH_4^+]
- Potasio [K^+]
- Magnesio [Mg^{2+}]
- Calcio [Ca^{2+}]

2.2.2. Alcalinidad

La alcalinidad del agua se puede definir como una medida de su capacidad para neutralizar ácidos.

En general, en las aguas naturales, los compuestos que más contribuyen a la alcalinidad son los bicarbonatos, puesto que se forman fácilmente por la acción del dióxido de carbono atmosférico sobre los materiales constitutivos de los suelos en presencia de agua, a través de la siguiente reacción:



Por tanto, se pretende medir la concentración de carbonatos y bicarbonatos disueltos en el agua, además del pH de la muestra.

Para ello, se empleará el valorador automático METROHM® 716 DMS Titrino, obteniendo concentraciones de carbonato y bicarbonato en mg/l y valor de pH de la muestra en cortos periodos de tiempo. El equipo se muestra en la Figura 4.12.



Figura 4.12. Valorador automático METROHM® 716 DMS Titrino.

4.2.3. Conductividad.

La conductividad (o conductancia específica) de una disolución de electrolito es una medida de su capacidad para conducir la electricidad. La unidad SI de conductividad es siemens por metro (S/m).

En muchos casos, la conductividad está directamente vinculada a la cantidad de sólidos totales disueltos (TDS). El agua desionizada de alta calidad tiene una conductividad de $5,5 \mu\text{S}/\text{m}$, el agua potable típica en el rango de $5\text{-}50 \text{ mS}/\text{m}$ [5].

Se emplea el equipo automático Cond 51 Bench Conductivimeter XS.



Figura 4.13. Cond 51 Bench Conductivimeter XS.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. Resultados y Discusión.

Para el estudio del comportamiento de la membrana de ósmosis inversa, se han realizado cuatro series de experimentos:

1. Con disoluciones sintéticas en una sola etapa.
2. Con agua de galería con baja concentración de fluoruro en una sola etapa, Aguamansa.
3. Con agua galería con alta concentración de fluoruro en una sola etapa, Hoya del Cedro.
4. Con agua de galería con alta concentración de fluoruro en varias etapas, Hoya del Cedro

5.1. Estudio con disoluciones sintéticas.

Para estudiar el comportamiento de la membrana frente al ion fluoruro se preparó una serie de disoluciones de NaF con concentraciones de fluoruro de 2,5; 5 y 7,5 ppm. Se utilizó la instalación descrita en la Figura 4.1, apartado 4.1.1, de Materiales y Métodos, en circuito cerrado, durante 210 minutos para cada una de las disoluciones, midiéndose el caudal de permeado y rechazo cada 30 minutos y tomando muestras de los mismos para el análisis de fluoruro. En la Tabla 5.1, se indican las condiciones de operación correspondientes.

| Condiciones de operación | |
|-------------------------------------|--------------------|
| Temperatura | 25 °C |
| Concentraciones disoluciones | 2,5; 5 y 7,5 ppm |
| Presión | 4,5 bar |
| Duración del experimento | 3,5 h |
| Circuito | Cerrado y continuo |

Tabla 5.1. Condiciones operación con disolución NaF para una misma presión.

Los resultados globales obtenidos para la concentración de fluoruro en el permeado, rechazo y recovery se muestran en el Anexo I, apartado a y los valores medios en la Tabla 5.2.

| $[F^-]_0$ (ppm) | $[F^-]$ (ppm) en permeado | % Rechazo $[F^-]$ | Recovery (%) |
|-----------------|---------------------------|-------------------|--------------|
| 2,5 | 0,14 | 94,4 | 37,23 |
| 5,0 | 0,17 | 96,5 | 43,46 |
| 7,5 | 0,18 | 97,6 | 46,39 |

Tabla 5.2. Valores medios de concentración de F^- en el permeado, % rechazo de fluoruro y recovery para las diferentes concentraciones, a 4,5 bar.

Además, se realizó el experimento para la concentración de 5 ppm de F^- , variando, en este caso, la presión. Se utilizó nuevamente la instalación descrita en la Figura 4.1, de Materiales y Métodos, con las mismas condiciones del experimento anterior. En la Tabla 5.3, se indican las condiciones de operación correspondientes.

| Condiciones de operación | |
|--------------------------|--------------------|
| Temperatura | 25 °C |
| Concentración disolución | 5 ppm |
| Presiones | 3,5; 4,0 y 4,5 bar |
| Duración del experimento | 3,5 h |
| Circuito | Cerrado y continuo |

Tabla 5.3. Condiciones operación con disolución NaF para 5 ppm con distintas presiones.

Los resultados globales obtenidos para la concentración de fluoruro en el permeado, rechazo y recovery se muestran en el Anexo I, apartado b y los valores medios en la Tabla 5.4. En la Figura 5.1 se representa el rechazo de eliminación de fluoruro frente a presión de operación y en la Figura 5.2, el recovery frente a la presión de operación.

| ΔP (bar) | $[F^-]_P$ (ppm) | % Rechazo $[F^-]$ | Recovery (%) |
|------------------|-----------------|-------------------|--------------|
| 3,5 | 0,15 | 96,94 | 26,53 |
| 4,0 | 0,16 | 96,88 | 38,73 |
| 4,5 | 0,17 | 96,54 | 43,46 |

Tabla 5.4. Valores medios de concentración de F^- en el permeado, % rechazo fluoruro y recovery para las diferentes concentraciones a 4,5 bar.

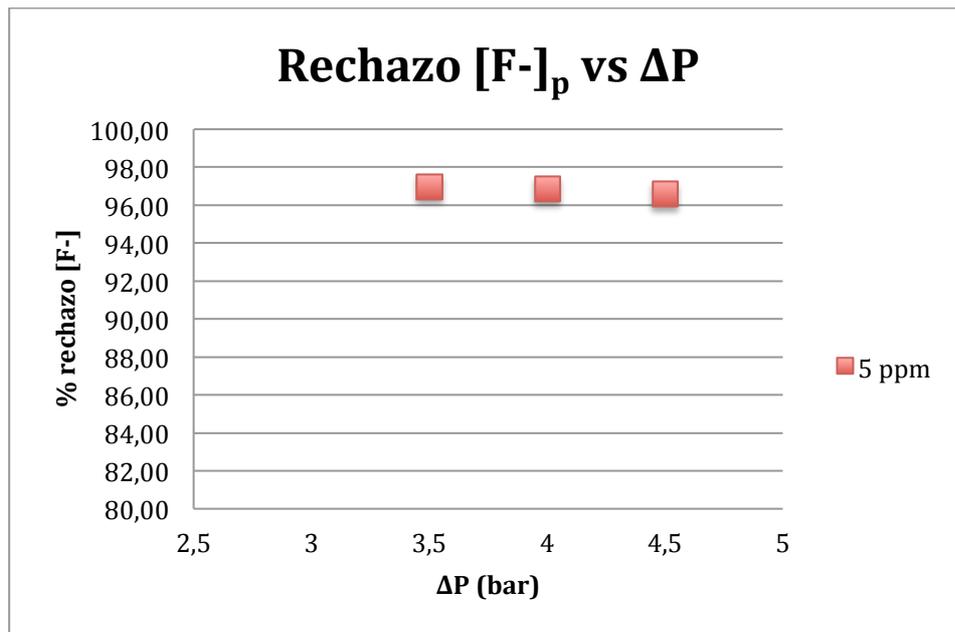


Figura 5.1. Rechazo de fluoruro en el permeado en función de las presiones para la misma concentración.

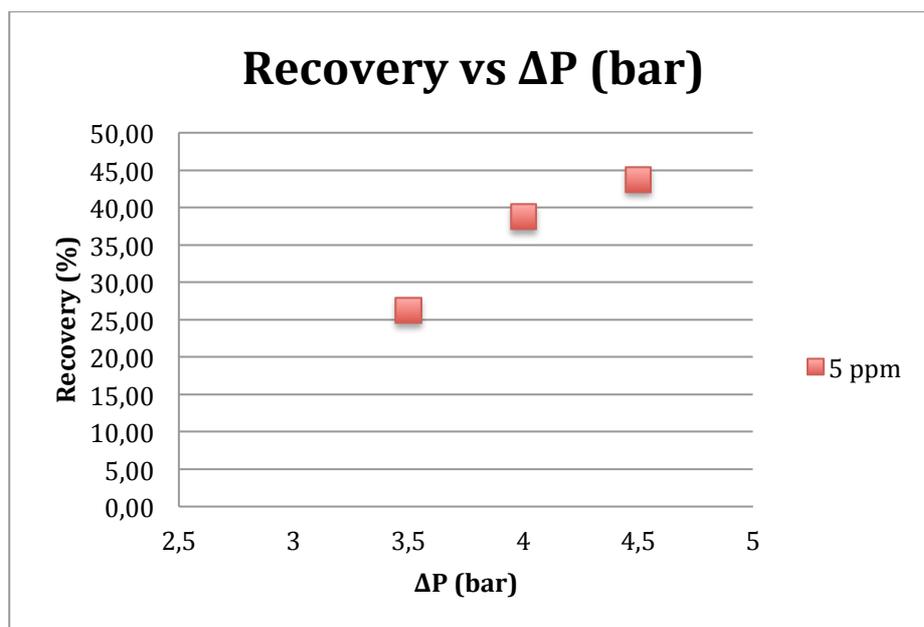


Figura 5.2. Relación entre el recovery y la presión de trabajo para presiones para la misma concentración.

Como se puede observar, en ambos experimentos los valores de fluoruro en el permeado, son valores muy próximos, entre 0,14 y 0,18 ppm. En cambio, los valores del recovery si se ven afectados por la presión (experimento de 5 ppm F⁻), pasando de 26,5 a 43,5%.

5.2. Estudio con agua de abasto municipal de Aguamansa.

Se decidió hacer el estudio con aguas de galería con diferentes concentraciones de fluoruro para así poder analizar el comportamiento de la membrana. En este caso, se utilizó agua de abasto municipal, procedente de la galería de Aguamansa (Municipio de La Orotava, en el norte de Tenerife).

Se utilizó la instalación descrita en la Figura 4.1.1, de Materiales y Métodos, en circuito cerrado, durante 180 minutos, midiéndose el caudal de permeado y rechazo cada 30 minutos y tomando muestras de los mismos para el análisis de aniones y cationes. En la Tabla 5.5, se indican las condiciones de operación correspondientes y en la Tabla 5.6, el análisis químico de la alimentación.

| Condiciones de operación | |
|---------------------------------|--------------------|
| Temperatura | 25 °C |
| Presiones | 3,5; 4,5 y 5 bar |
| Duración del experimento | 3 h |
| Circuito | Cerrado y continuo |

Tabla 5.5. Condiciones operación para el agua de la galería de Aguamansa.

- Análisis químico de la alimentación

| Ion | ppm | | |
|--------------------|-------|------------------------------|------|
| Fluoruro | 2,15 | pH | 8,63 |
| Cloruro | 14,4 | Conductividad (µS/cm) | 1673 |
| Bromuro | 0,0 | LSI | 0,97 |
| Nitrato | 2,5 | | |
| Fosfato | 0,5 | | |
| Sulfato | 26,6 | | |
| Sodio | 252,4 | | |
| Potasio | 48,6 | | |
| Magnesio | 106,2 | | |
| Calcio | 19,8 | | |
| Carbonato | 54,7 | | |
| Bicarbonato | 1088 | | |

Tabla 5.6. Análisis químico del agua de alimentación.

Los resultados obtenidos para caudales de permeado, rechazo y recovery, para cada una de las presiones de trabajo se indican en el Anexo II.

En la Tabla 5.7, se muestran los valores medios obtenidos para la composición del permeado, en función de la presión de trabajo, junto con la conductividad y valor del “Langelier Saturation Index”, LSI.

| | 3,5 bar | 4,5 bar | 5,0 bar |
|--------------------------------------------|---------|---------|---------|
| Fluoruro (ppm) | 0,1 | 0,2 | 0,2 |
| Cloruro (ppm) | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| Bromuro (ppm) | - | - | - |
| Nitrato (ppm) | 0,3 | 0,1 | 0,3 |
| Fosfato (ppm) | - | - | - |
| Sulfato (ppm) | 1,3 | 1,2 | 1,2 |
| | | | |
| Sodio (ppm) | 6,3 | 5,2 | 4,9 |
| Potasio (ppm) | 1,2 | 1,1 | 1,1 |
| Magnesio (ppm) | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| Calcio (ppm) | 0,4 | 0,0 | 0,8 |
| | | | |
| [CO₃²⁻] (ppm) | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| [HCO₃⁻] (ppm) | 23,1 | 24,2 | 18,5 |
| pH | 6,8 | 7,1 | 6,8 |
| | | | |
| Conductividad (µS/cm) | 31,6 | 31,2 | 22,5 |
| LSI | -3,6 | -4,7 | -3,5 |

Tabla 5.7. Análisis químico del permeado.

Como se puede observar, en cualquier caso, la concentración de fluoruro se mantiene muy por debajo del valor indicado como máximo en la legislación vigente. En cambio, según el valor del LSI, se trata de un agua de corrosión severa, no saturada respecto a carbonato cálcico y posee la tendencia de eliminar las incrustaciones de ese compuesto presentes que protegen las tuberías y equipos, según las Tablas 3.5 y 3.6, Introducción.

En la Tabla 5.8, se muestran los valores medios del rechazo correspondientes a cada una de las tres presiones de trabajo.

| | 3,5 bar | 4,5 bar | 5,0 bar |
|--------------------------------------------|---------|---------|---------|
| Fluoruro (ppm) | 2,2 | 6,6 | 6,7 |
| Cloruro (ppm) | 12,1 | 12,0 | 11,9 |
| Bromuro (ppm) | 0 | 0 | 0 |
| Nitrato (ppm) | 0,8 | 1,1 | 0,9 |
| Fosfato (ppm) | 0,9 | 0,8 | 0,9 |
| Sulfato (ppm) | 23,0 | 23,8 | 24,0 |
| | | | |
| Sodio (ppm) | 224,5 | 223,2 | 220,4 |
| Potasio (ppm) | 44,9 | 41,0 | 39,7 |
| Magnesio (ppm) | 92,9 | 91,0 | 87,6 |
| Calcio (ppm) | 20,2 | 26,0 | 27,8 |
| | | | |
| [CO₃²⁻] (ppm) | 57,3 | 61,4 | 72,0 |
| [HCO₃⁻] (ppm) | 937,8 | 928,7 | 909,6 |
| pH | 8,7 | 8,7 | 8,7 |
| | | | |
| Conductividad (µS/cm) | 1469 | 1436 | 1357 |
| LSI | 1,0 | 1,1 | 1,4 |

Tabla 5.8. Análisis químico del rechazo.

Respecto a la composición del rechazo se puede observar que la concentración de fluoruro varía entre 2 y 7 ppm, con valores de conductividad y LSI, relativamente altos.

5.3. Estudio con agua de la galería de Hoya del Cedro.

Como se comentó en el apartado 3.2.2, de la Introducción, se sabe que las aguas del norte de la isla de Tenerife son las que más problemas tienen con el alto contenido en fluoruro. Por esa razón, se decidió trabajar con el agua de la galería de Hoya del Cedro, situada en los altos de Icod de los Vinos, cuyo análisis se indica en la Tabla 5.9.

| Ion | ppm | | |
|--------------------|------------|-----------------------------------------------------------|------|
| Fluoruro | 11,1 | pH | 8,13 |
| Cloruro | 27,7 | Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | 2320 |
| Bromuro | 0,1 | LSI | 0,69 |
| Nitrato | 2,3 | | |
| Fosfato | 0,9 | | |
| Sulfato | 90,8 | | |
| Sodio | 468,8 | | |
| Potasio | 75,3 | | |
| Magnesio | 72,5 | | |
| Calcio | 29,5 | | |
| Carbonato | 28,3 | | |
| Bicarbonato | 1440 | | |

Tabla 5.9. Análisis del agua de la galería de Hoya del Cedro.

Se utilizó la instalación descrita en la Figura 4.1, de Materiales y Métodos, en circuito cerrado, durante 240 minutos, midiéndose el caudal de permeado y rechazo, cada 60 minutos, y tomando muestras de los mismos para el análisis de aniones y cationes. El resto de condiciones experimentales se indican en la Tabla 5.10.

| Condiciones de operación | |
|---------------------------------|--------------------|
| Temperatura | 25 °C |
| Presiones | 3,5; 4,5 y 5 bar |
| Duración del experimento | 4 h |
| Circuito | Cerrado y continuo |

Tabla 5.10. Condiciones operación para el agua de Hoya del Cedro.

Los resultados obtenidos para caudales de permeado y de rechazo, y recovery, así como los de la composición del permeado y del rechazo para cada una de las presiones de trabajo, se indican en las tablas del Anexo III.

A continuación, en la Tabla 5.11, se indican los valores medios obtenidos para la composición del permeado, en función de la presión de trabajo, junto a la conductividad y el LSI.

| | 3,5 bar | 4,5 bar | 5,0 bar |
|--------------------------------------------|---------|---------|---------|
| Fluoruro (ppm) | 0,3 | 0,4 | 0,4 |
| Cloruro (ppm) | 0,7 | 1,2 | 1,1 |
| Bromuro (ppm) | - | - | - |
| Nitrato (ppm) | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Fosfato (ppm) | 0 | 0 | 0 |
| Sulfato (ppm) | 1,6 | 2,0 | 1,9 |
| | | | |
| Sodio (ppm) | 12,7 | 17,9 | 16,7 |
| Potasio (ppm) | 2,0 | 2,8 | 2,3 |
| Magnesio (ppm) | 0 | 0 | 0 |
| Calcio (ppm) | 0,5 | 0,0 | 2,5 |
| | | | |
| [CO₃²⁻] (ppm) | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| [HCO₃⁻] (ppm) | 40,8 | 52,6 | 39,4 |
| pH | 6,9 | 6,8 | 7,4 |
| | | | |
| Conductividad (μS/cm) | 63,1 | 82,8 | 60,9 |
| LSI | -3,4 | -3,8 | -2,1 |

Tabla 5.11. Análisis químico del permeado.

Como con el agua de la galería de Aguamansa, en estos casos las concentraciones de fluoruro en el permeado se mantienen muy por debajo del límite la legislación vigente. Además, también ocurre lo mismo respecto el LSI, que se trata de un agua de corrosión severa.

A continuación, en la Tabla 5.12, se indican los valores medios obtenidos para la composición del rechazo, en función de la presión de trabajo, junto a la conductividad y el LSI.

| | 3,5 bar | 4,5 bar | 5,0 bar |
|--------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Fluoruro (ppm) | 9,5 | 11,1 | 14,6 |
| Cloruro (ppm) | 24,9 | 30,0 | 37,6 |
| Bromuro (ppm) | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Nitrato (ppm) | 1,1 | 1,1 | 0,9 |
| Fosfato (ppm) | 0,6 | 1,2 | 1,4 |
| Sulfato (ppm) | 80,1 | 119,3 | 126,3 |
| | | | |
| Sodio (ppm) | 461,5 | 618,2 | 696,6 |
| Potasio (ppm) | 76,2 | 100,9 | 114,2 |
| Magnesio (ppm) | 92,0 | 107,4 | 120,3 |
| Calcio (ppm) | 30,1 | 43,1 | 36,1 |
| | | | |
| [CO₃²⁻] (ppm) | 6,2 | 17,4 | 69,6 |
| [HCO₃⁻] (ppm) | 1597 | 2041 | 1897 |
| pH | 8,2 | 8,3 | 8,6 |
| | | | |
| Conductividad (μS/cm) | 2363 | 3046 | 2880 |
| LSI | 0,9 | 1,2 | 1,5 |

Tabla 5.12. Análisis químico del rechazo.

5.4. Comparación de resultados de las dos galerías.

- Rechazo de aniones

En las Figuras 5.3 y 5.4, se muestran los resultados del rechazo de aniones en función de las presiones de trabajo para el agua de las galerías de Aguamansa y Hoya del Cedro, respectivamente.

Se puede observar, que para el fluoruro, bromuro, fosfato y sulfato los rechazos son superiores al 90% en todos los casos.

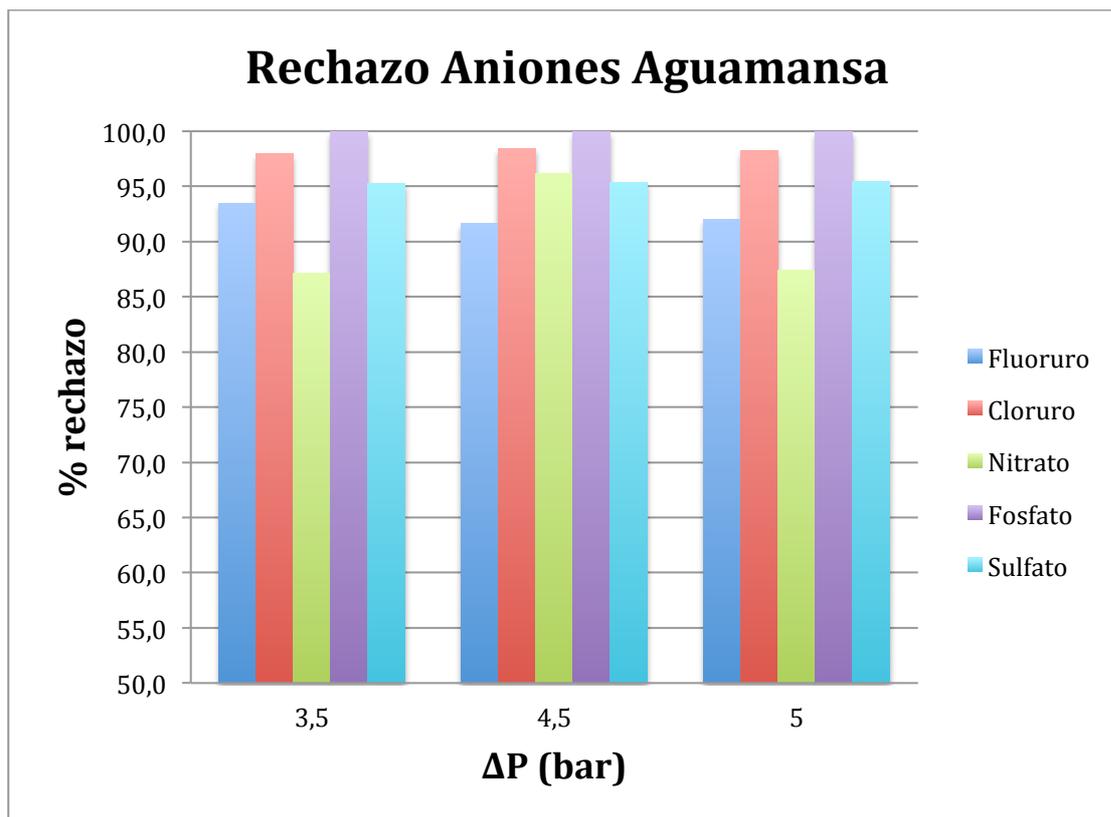


Figura 5.3. Rechazo Aniones Aguamansa.

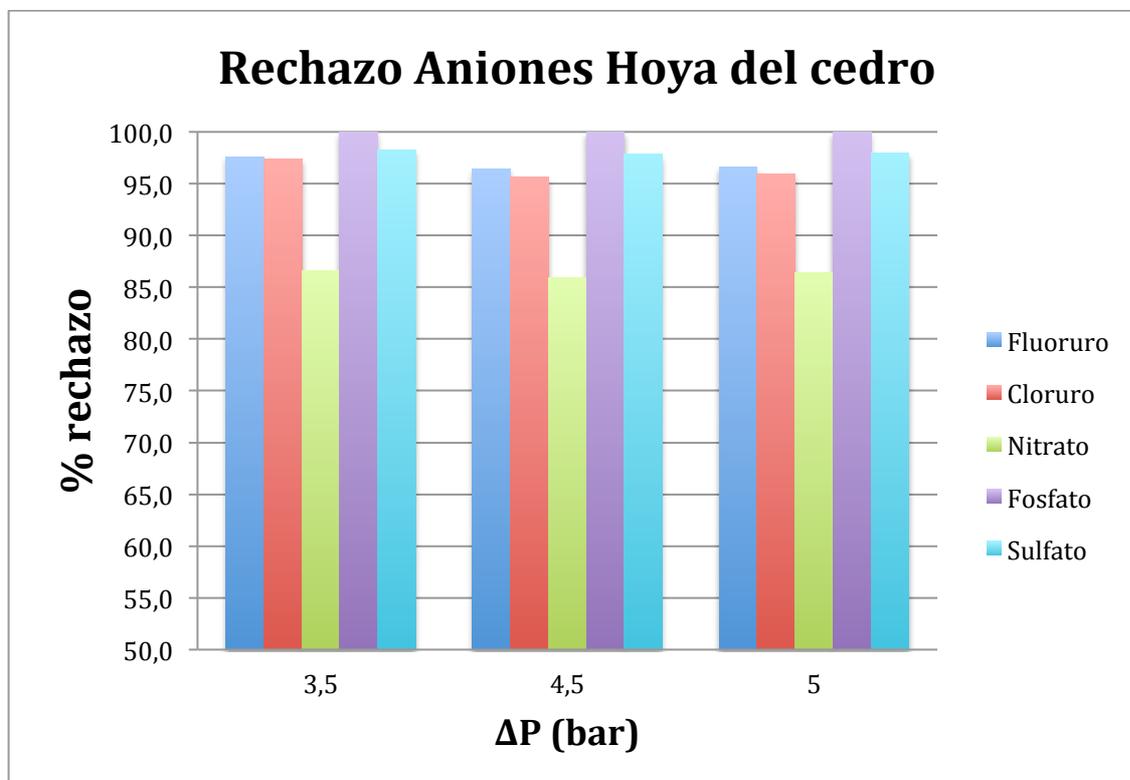


Figura 5.4. Rechazo Aniones Hoya del cedro.

○ Rechazo de cationes

En las Figuras 5.5 y 5.6, se muestran los resultados del rechazo de cationes en función de las presiones de trabajo, para la galería de Aguamansa y Hoya del Cedro, respectivamente.

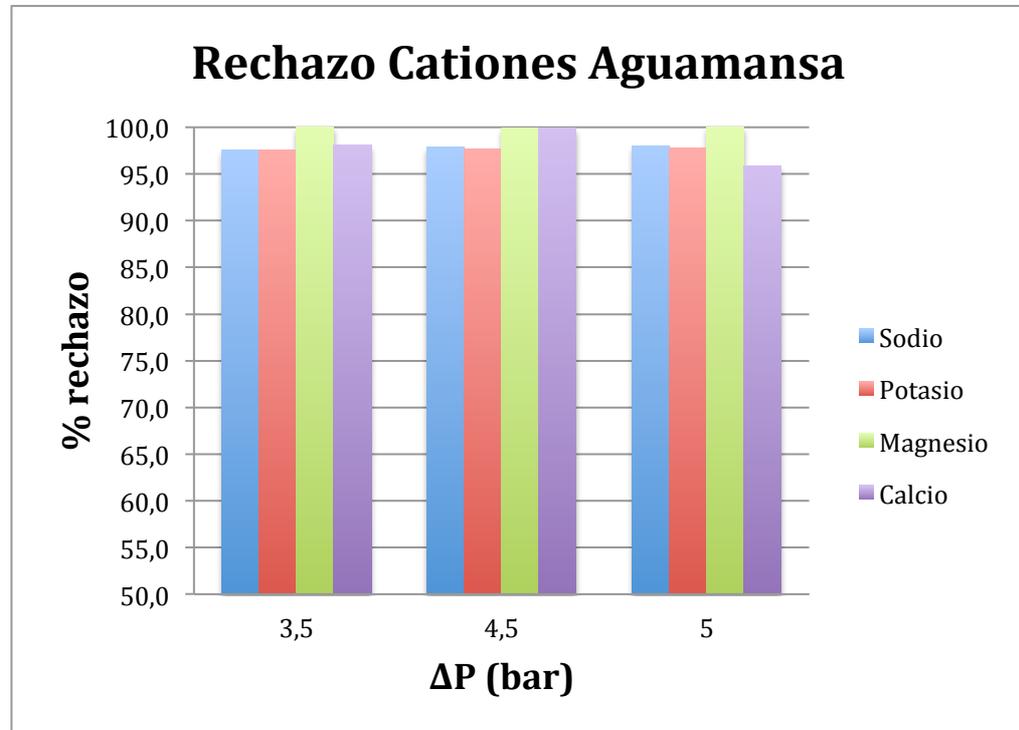


Figura 5.5. Rechazo cationes Aguamansa.

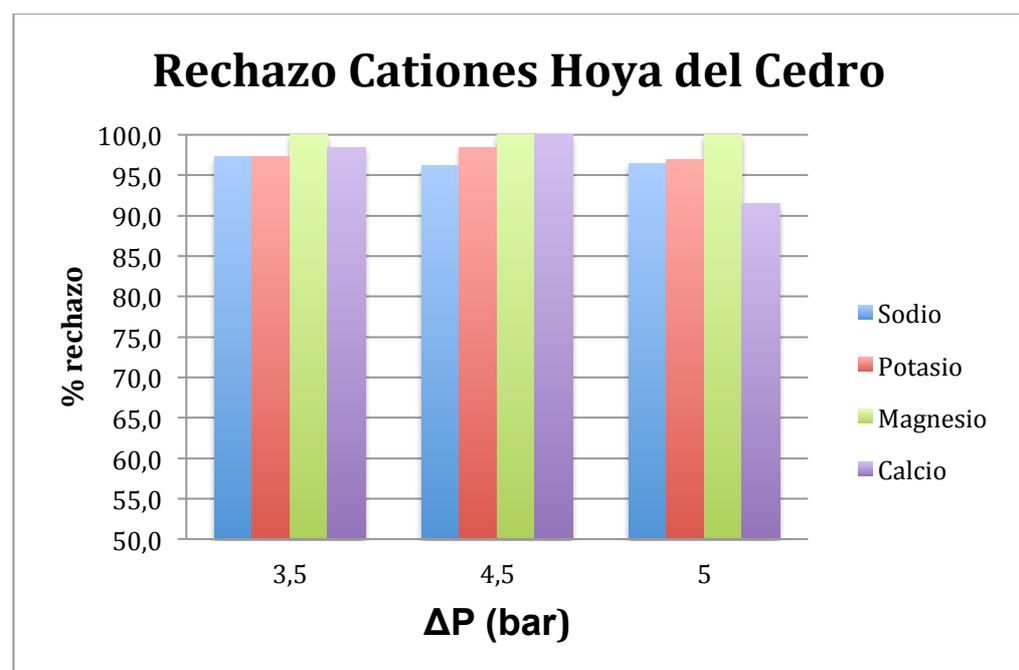


Figura 5.6. Rechazo cationes Hoya del Cedro.

Observándose en el caso del sodio, potasio, magnesio y calcio, rechazos entre al 95-100%.

Se puede concluir que en esta membrana el rechazo de aniones y cationes se encuentra, generalmente, por encima del 90 - 95 %.

○ Recovery

En la Figura 5.7 se representan los diferentes recovery para el agua de Aguamansa y el agua de Hoya del Cedro.

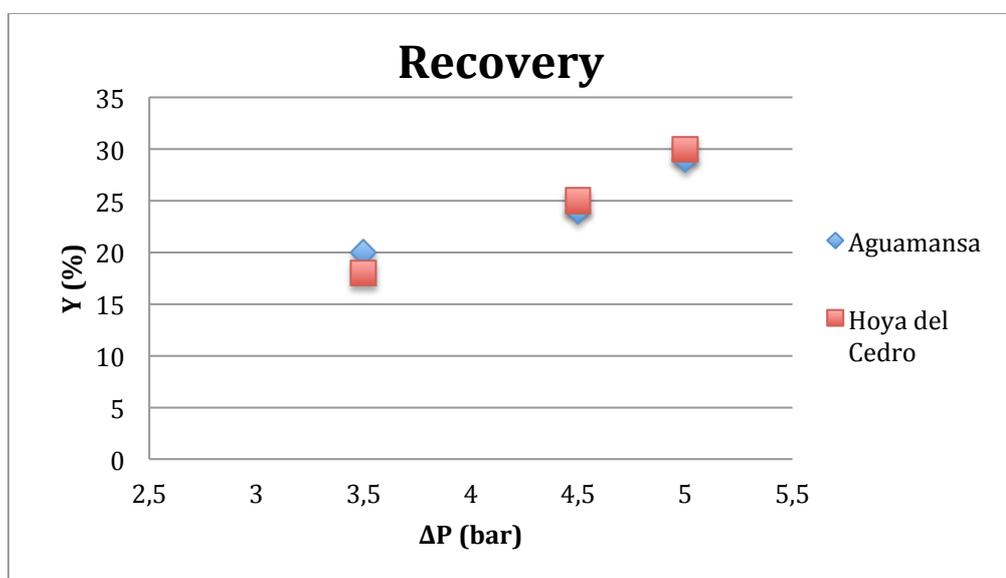


Figura 5.7. Variación del recovery en función de la presión.

Se puede afirmar, que la concentración de fluoruro en todos los permeados obtenidos está por debajo del límite máximo establecido por la legislación vigente. Así mismo, se puede observar cómo el rechazo de fluoruro, por esta membrana, es superior al 90 %, para cualquiera de las condiciones de trabajo utilizadas. En cambio, los valores del LSI indican que se obtiene un agua calificada como “corrosión severa”.

En cuanto a los valores del recovery, se demuestra que es independiente de la concentración inicial, ya que a pesar de tener concentraciones diferentes, dan valores similares para cada presión.

5.5. Estudio con agua de Hoya del Cedro utilizando varias etapas.

Como propuesta de mejora y con el objetivo de aumentar el recovery, se decidió simular una instalación en varias etapas tal y como se describe en el capítulo 4, Materiales y Métodos, apartado 4.1.4. Como se puede observar, el rechazo de la primera etapa se utiliza como alimentación de una segunda etapa y el rechazo de esta segunda como alimentación de una tercera y así sucesivamente. Las condiciones de operación utilizadas, en cada una de las etapas, se indican en la Tabla 5.13.

| Condiciones de operación | |
|---------------------------------|---------|
| Temperatura | 20 °C |
| Presiones | 3,5 bar |
| Circuito | Abierto |

Tabla 5.13. Condiciones de operación para una instalación de varias etapas.

Como se explicaba en el apartado 2.1.4, el experimento se repetiría tantas veces como fuera necesario hasta obtener un recovery entre el 75 y 80%, o si se superara el límite de la concentración de fluoruro permitido, 1,5mg/l.

El esquema a seguir para hacer el balance y poder calcular los volúmenes de alimentación, permeado y rechazo de cada una de las etapas y así calcular el permeado total, se muestra en la Figura 5.8.

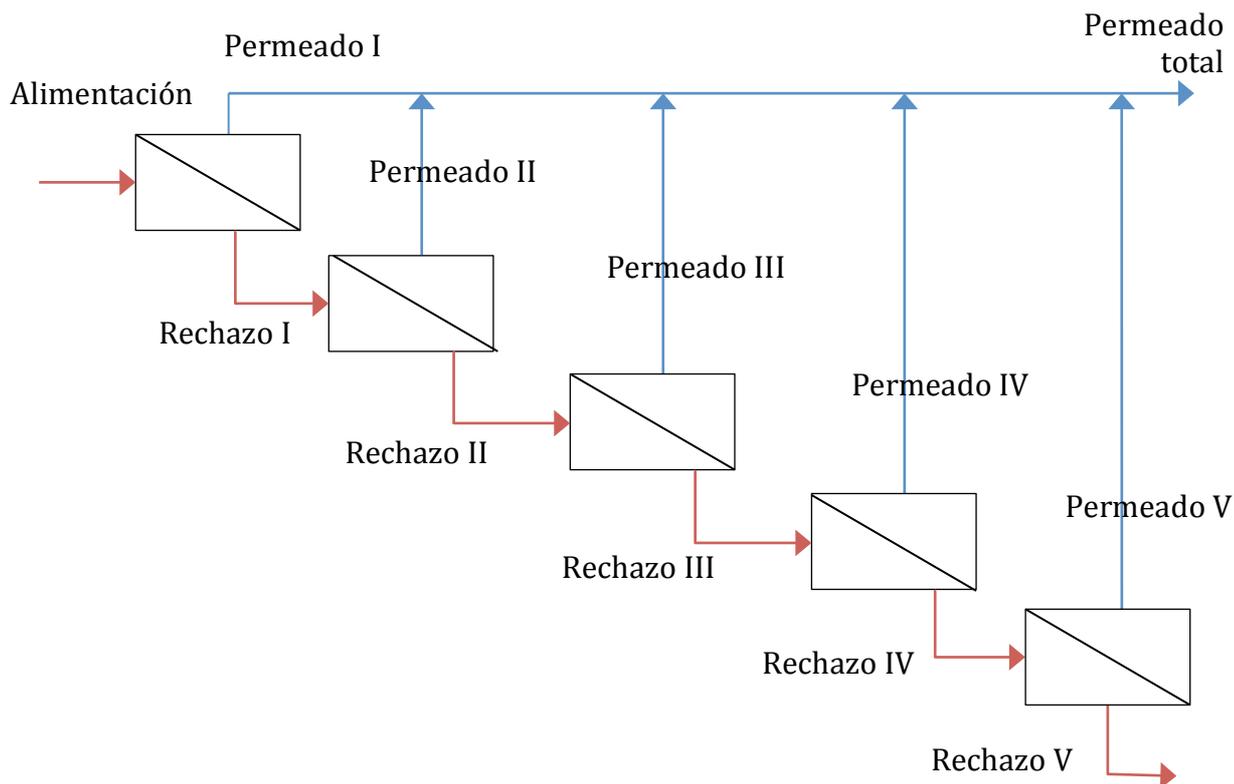


Figura 5.8. Diagrama del experimento realizado.

El agua de alimentación en este experimento es la misma que la que se utilizó en el Apartado 5.3, la Tabla 5.9, de la galería de la Hoya del Cedro, en los altos de Icod de los Vinos. En la Tabla 5.14 se indican los resultados de los permeados obtenidos en cada una de las etapas, el LSI y el recovery, y en la Tabla 5.15 el de los rechazos correspondientes.

- Análisis para el permeado

| | Etapa I | Etapa II | Etapa III | Etapa IV | Etapa V |
|--------------------------------------------|---------|----------|-----------|----------|---------|
| Fluoruro (ppm) | 0,3 | 0,5 | 0,4 | 0,6 | 0,6 |
| Cloruro (ppm) | 1,4 | 1,9 | 1,8 | 2,5 | 2,7 |
| Bromuro (ppm) | - | - | - | - | - |
| Nitrato (ppm) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Fosfato (ppm) | - | - | - | - | - |
| Sulfato (ppm) | 3,7 | 4,1 | 3,6 | 4,1 | 4,2 |
| | | | | | |
| Sodio (ppm) | 20,0 | 30,1 | 26,9 | 33,5 | 25,7 |
| Potasio (ppm) | 3,0 | 4,6 | 4,8 | 5,4 | 4,2 |
| Magnesio (ppm) | 1,0 | 2,8 | 2,6 | 1,6 | 1,7 |
| Calcio (ppm) | 0,8 | 1,8 | 1,8 | 1,2 | 2,0 |
| | | | | | |
| [CO₃²⁻] (ppm) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| [HCO₃⁻] (ppm) | 66,4 | 85,9 | 71,3 | 90,8 | 74,2 |
| pH | 8,0 | 7,9 | 7,8 | 7,3 | 7,5 |
| | | | | | |
| Conductividad (μS/cm) | 115,5 | 145,3 | 121,7 | 157,4 | 125,1 |
| LSI | -1,9 | -1,6 | -1,7 | -2,3 | -1,9 |
| Recovery (%) | 35,2 | 26,3 | 27,2 | 27,9 | 22,9 |

Tabla 5.14. Análisis químico del permeado.

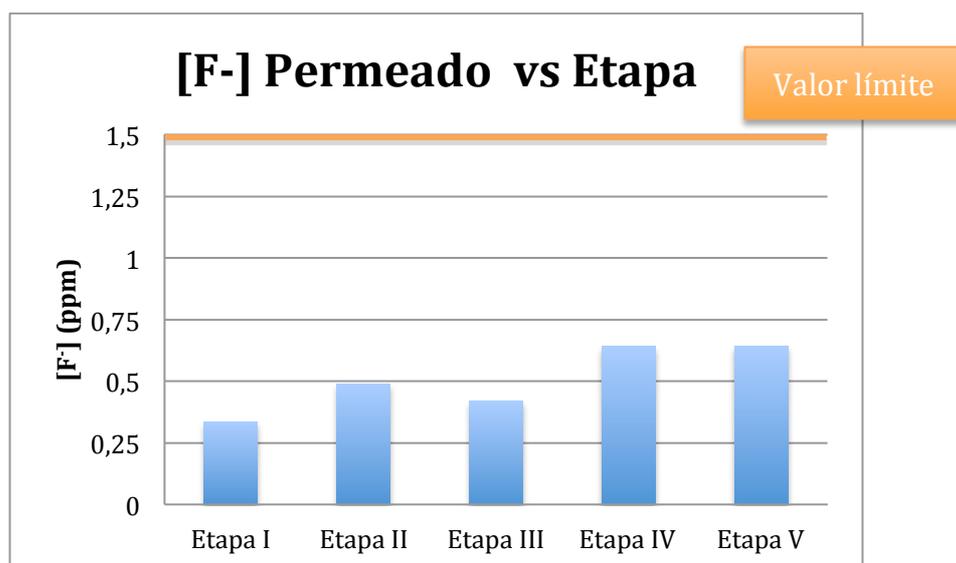


Figura 5.9. Composiciones de fluoruro en cada etapa.

| | Etapa I | Etapa II | Etapa III | Etapa IV | Etapa V |
|--------------------------------------------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|
| Fluoruro (ppm) | 13,9 | 16,1 | 18,5 | 20,0 | 22,3 |
| Cloruro (ppm) | 36,3 | 42,7 | 48,6 | 51,1 | 59,1 |
| Bromuro (ppm) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Nitrato (ppm) | 1,8 | 2,0 | 1,6 | 1,6 | 1,4 |
| Fosfato (ppm) | - | - | - | - | - |
| Sulfato (ppm) | 120,2 | 142,5 | 164,4 | 181,9 | 203,7 |
| | | | | | |
| Sodio (ppm) | 636,3 | 807,7 | 900,4 | 963,1 | 898,5 |
| Potasio (ppm) | 97,1 | 133,9 | 150,2 | 160,0 | 148,8 |
| Magnesio (ppm) | 89,9 | 122,1 | 134,4 | 147,6 | 136,9 |
| Calcio (ppm) | 27,0 | 34,4 | 37,4 | 30,4 | 17,4 |
| | | | | | |
| [CO₃²⁻] (ppm) | 165,1 | 14,9 | 157,0 | 193,0 | 236,2 |
| [HCO₃⁻] (ppm) | 2048 | 2454 | 2359 | 2713 | 2204 |
| pH | 8,2 | 8,2 | 8,8 | 8,8 | 8,9 |
| | | | | | |
| Conductividad (μS/cm) | 3060 | 3640 | 3890 | 4380 | 3930 |
| LSI | 0,9 | 1 | 1,7 | 1,6 | 1,4 |

Tabla 5.15. Análisis químico del rechazo.

Como se puede observar, después de 5 etapas, no se alcanza el valor límite para el fluoruro de 1,5 ppm y el recovery es del orden del 81 %.

Sabiendo el volumen inicial y el rechazo final se obtuvo un recovery total de 80,70%.

5.6. Amortización del equipo a 5 años.

El objetivo de este apartado es hacer una somera comparación de costes entre el uso de un equipo doméstico de ósmosis inversa (como el descrito), durante 5 años, para generar agua de consumo humano o emplear agua embotellada para ese mismo fin. Se supone, como hipótesis de partida, un hogar con un consumo medio diario de 12 L/día para una familia de 4 personas.

5.6.1. Equipo de ósmosis inversa.

Para este cálculo se debe tener en cuenta el coste del equipo y de la bomba, el mantenimiento que requiere la instalación y los consumos de agua y electricidad.

○ Coste del equipo:

Equipo de ósmosis inversa 5 etapas STORM RO-100 → 122,95 €/5 años

Bomba para equipos de ósmosis y ultrafiltración STORM → 99,00 €/5 años

TOTAL: 221,95 €/5 años

○ Mantenimiento de la instalación:

Según el fabricante de este equipo, se recomienda el cambio de los filtros de la membrana una vez al año, ya que a partir de esta fecha empieza a funcionar de forma defectuosa.

Pack de 3 pre-filtros y post-filtro de 10''

para equipo STORM de 5 etapas → 12,95 €/año

Membrana VONTRON ULP 1812-50 → 24,95 €/año

TOTAL: 37,90 €/año

TOTAL (cada 5 años): 151,60 €/5 años

○ Consumo de agua

Caudal de permeado = $12 \frac{L}{día}$ → Caudal de alimentación con un recovery del 35%



$$Q_A = 34,3 \text{ L/día} (0,0343 \text{ m}^3/\text{día}) (1,0633 \text{ m}^3/\text{mes})$$

La tarifa de consumo para el agua de un municipio típico del norte de Tenerife, para caudales comprendidos entre 0 y 10 m³/bimestral, se sitúa en 0,70 €/m³, (fijado en el BOP de Santa Cruz de Tenerife núm. 183, de fecha 31 de diciembre de 2012, ANEXO), por lo que el consumo de agua durante 5 años será de:

$$1,029 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \times 0,70 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \times \frac{12 \text{ meses}}{1 \text{ año}} = 8,644 \text{ €/año}$$

TOTAL (cada 5 años): 43,218 €/5 años

○ Consumo eléctrico

El consumo eléctrico viene por el funcionamiento de la bomba. Los precios de consumo vienen reflejados en el BOE núm. 185, de fecha 3 de agosto de 2013. Para poder calcular dicho consumo, debe conocerse antes cuánto tiempo se debe tener conectada la bomba para obtener el caudal deseado de 12 L/día. Según el fabricante el caudal de bombeo máximo es 0,8 L/min.

$$12 \frac{L}{día} \times \frac{1 \text{ min}}{0,8 L} \times \frac{1 h}{60 \text{ min}} = 0,25 \frac{h}{día} \times \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} = 7,5 \text{ h/mes}$$

La bomba, según los cálculos anteriores, debe estar funcionando 7,5 h/mes implicando el consumo que se muestra a continuación.

Según el fabricante, el consumo de trabajo de la bomba es de 0,65 A y un voltaje de 24 V, por lo que:

$$W = V \times A \rightarrow W = 0,65 \text{ A} \times 24 \text{ V} \rightarrow W = 15,6 \text{ W}$$

$$15,6 \text{ W} \times 7,5 \frac{h}{\text{mes}} = 117 \frac{Wh}{\text{mes}} = 0,117 \text{ kWh/mes}$$

$$0,017 \frac{kWh}{mes} \times 0,124985 \frac{\text{€}}{kWh} \times \frac{12 \text{ meses}}{1 \text{ año}} = 0,175 \text{ €/año}$$

Consumo en eléctrico: 0,175 €/año

TOTAL (7% IGIC): 0,187 €/año

TOTAL (cada 5 años): 0,94 €/5 años

○ Coste total

| | Coste (€/5 años) |
|------------------------|------------------|
| Equipo de O.I. + bomba | 221,95 |
| Mantenimiento | 151,60 |
| Consumo de agua | 43,22 |
| Consumo eléctrico | 0,94 |
| COSTE TOTAL | 417,71 |

Tabla 5.16. Coste de un equipo de OI durante 5 años para generar agua de consumo humano.

5.6.2. Agua embotellada.

El precio medio de las garrafas de agua de 5L se sitúa en torno a 1€ (0,20€/L).

$$0,20 \frac{\text{€}}{\text{L}} \times 12 \frac{\text{L}}{\text{día}} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} = 876 \frac{\text{€}}{\text{año}} \times 5 \text{ años} = \mathbf{4\ 380\text{€/5 años}}$$

Se observa que es mucho más rentable emplear un equipo de OI para uso doméstico que consumir agua embotellada, siendo 10,5 veces más caro utilizar esta última.

5.6.3. Aprovechamiento rechazo del equipo.

Al principio de este apartado, se estimó un consumo de 12 L/día en un hogar para una familia de 4 personas. Calculando con el recovery medio, se obtuvo una alimentación total de 34,3 L/día. Si se restan los 12 litros a la cantidad total, se observa que existe un rechazo de 22,3 L/día, que en principio se tiran por el desagüe.

Para obtener un mayor aprovechamiento del equipo de ósmosis, se pretende estimar cuánto dinero se podría llegar a ahorrar si se utilizara esa agua de rechazo para otros usos domésticos.

Si se consiguiera almacenar los 22,3 L de agua el ahorro sería de:

$$0,70 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \times 0,0223 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 5,70 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

A pesar de que no es una gran pérdida si hablamos solo de un hogar (22,3 L/día), si se calcula la pérdida anual para un municipio de aproximadamente 23.000 habitantes, si cada hogar contara con un equipo de OI :

$$22,3 \frac{\text{L}}{\text{día} \cdot \text{hogar}} \div 4 \text{ hab/hogar} = 5,58 \frac{\text{L}}{\text{día} \cdot \text{habitante}}$$

$$5,58 \frac{\text{L}}{\text{día} \cdot \text{habitante}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} 23000 \text{ habitantes} \times \frac{365 \text{ días}}{\text{año}} = 46\,800 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$46800 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \times 0,70 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} = 32\,760 \text{ €/año}$$

Se desaprovecharían 46.800 m³ de agua por año y se perderían 32.760 €. Y aunque para un hogar solo sería una pérdida diaria de 22,3L o 5,70€; si se hace un cálculo para todo el municipio se ahorraría dinero y agua.

El problema del agua de rechazo es debido a su alto contenido en sales lo que implica que no sirve para todo tipo de actividades cotidianas, pero una opción que se considera razonable sería para la limpieza de las calles, por ejemplo. Y a pequeña escala, en cada hogar, utilizarla como agua de cisterna o para la limpieza de terrazas o azoteas.

En resumen, aunque la pérdida individual, en cada familia, no sea desorbitada ni en volumen ni económica, se proponen esas soluciones mirando por la conservación del medio ambiente.

6. CONCLUSIONES

6. Conclusiones.

El estudio realizado con una membrana de ósmosis inversa, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

1. Para los experimentos realizados con aguas sintéticas:
 - a. En ambos experimentos todos los valores de concentración fluoruro en el permeado, son valores muy próximos, entre 0,14 y 0,18 ppm.
 - b. En cambio, los valores del recovery si se ven afectados por la presión de trabajo (experimento de 5 ppm F⁻), pasando de 26,5 a 43,5%.

2. Para los experimentos realizados con agua de la galería de Aguamansa:
 - a. En cualesquiera de los casos, la concentración de fluoruro en el permeado, se mantiene muy por debajo del valor indicado como máximo en la legislación vigente.
 - b. Tanto los aniones como los cationes, son eliminados por encima del 90%
 - c. En cambio, según el valor del LSI, se trata de un agua de corrosión severa, no saturada respecto a carbonato cálcico y posee la tendencia de eliminar las incrustaciones de ese compuesto.
 - d. Respecto a la composición del rechazo, se puede observar que la concentración de fluoruro se mueve entre 2 y 7 ppm, con valores de conductividad y LSI, relativamente altos.

3. Para los experimentos con agua de la galería de Hoya del Cedro:
 - a. Las concentraciones de fluoruro en el permeado se mantienen muy por debajo de la legislación vigente.
 - b. Tanto los aniones como los cationes, son eliminados por encima del 90%
 - c. Además, también ocurre lo mismo respecto el LSI, que se trata de un agua de corrosión severa.

4. Para el experimento con aguas de Hoya del Cedro de varias etapas:
 - a. No se alcanza el valor límite para el fluoruro de 1,5 ppm para ninguna de las 5 etapas.
 - b. Se obtuvo un recovery total de 80,70%, cumpliendo lo previsto.

5. Por último, para el estudio de amortización del equipo en 5 años:
 - a. Se observa que es mucho más rentable emplear un equipo de O.I. para uso doméstico que consumir agua embotellada, siendo 10,5 veces más caro utilizar esta última.
 - b. Para el rechazo del equipo, se concluye, que a pesar de no ser una gran pérdida ni económica ni volumétrica, es necesario un aprovechamiento de esa agua mirando por la conservación del medio ambiente.

CONCLUSIONS.

The study with a reverse osmosis membrane has allowed us to reach the following conclusions:

1. For the synthetic water experiment:
 - a. As can be seen, in both experiments both the fluoride values in the permeate are very close values, between 0.14 and 0.18 ppm.
 - b. Conversely, recovery values are affected by pressure (5 ppm F-), from 26.5 to 43.5.

2. For the experiment carried out with Aguamansa waters:
 - a. In any case, the concentration of fluoride in the permeate remains well below the maximum value indicated in the current legislation.
 - b. Both anions and cations are eliminated in more than 90%
 - c. In contrast, according to the value of the LSI, it is a water of severe corrosion, unsaturated with respect to calcium carbonate and has the tendency to eliminate incrustations of said compound.
 - d. Regarding the composition of the rejection, it is observed that the concentration of fluoride moves between 2 and 6 ppm, with values of conductivity and LSI relatively high.

3. For the Hoya del Cedro experiment:
 - a. The concentrations of fluorine in the permeate remain well below current legislation.
 - b. Both anions and cations are eliminated in more than 90%
 - c. In addition, the same is true for LSI, which is a water of severe corrosion.

4. For the experiment with Hoya del Cedro waters of several stages:
 - a. The limit value for fluoride of 1.5 ppm is not reached for any of the 5 steps.
 - b. A total recovery of 80.70% was obtained, as expected.

5. Finally, for the study of the depreciation of the equipment in 5 years:
 - a. It is noted that it is much more cost effective to employ an O.I. For domestic use you consume bottled water, being 10.5 times more expensive to use the latter.
 - b. For the rejection of the team, it is concluded that, despite not being a great loss, neither economic nor volumetric, it is necessary to take advantage of this water seeking the conservation of the environment.

7 BIBLIOGRAFÍA

7. Bibliografía.

AEMA, Agencia Europea de Medio Ambiente, 2009. Sequía y consumo excesivo de agua en Europa.

Asamblea General Naciones Unidas, “Resolución aprobada por la Asamblea General el 28 de julio de 2010”, 2010.

Ayoob, S., Gupta, A. K., Bhat., V. T., 2008. A Conceptual Overview on Sustainable Technologies for the Defluoridation of Drinking Water. *Critical Reviews in Environmental Science Technology*, 38, 401-470.

Ben Nasr, A., Charcosset, C., Ben Amar, R., Walha, K., 2013. Defluoridation of water by nanofiltration. *Journal of Fluorine Chemistry*, 150, 92-97.

Buisson, H., Diawara, C. K., A. Lhassani, Pontié, M., Rumeau, M., 2004. Nanofiltration pour l'élimination selective d'ions cibles presents dans l'eau de mer et les eaux saumâtres

Calidad de las aguas destinadas al consumo humano, DIRECTIVA 98/83/CE DEL CONSEJO de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de la aguas destinadas al consumo humano [7]

Cortés, F., Chejne, D., Vélez, F., Chejne, F., 2007. Operación óptima de desalación de agua por ósmosis inversa. Facultad de Mines, Universidad Nacional de Colombia.

Culp, R., Stolenberg, H., 1958. Fluoride reduction at La Cross, Kan, J. *AWWA*, 50 (3), 423-431.

Definición de flúor. Disponible en URL: <https://www.webelements.com/fluorine/>

Díaz González, F., 2012. Guía didáctica: Procesos de desalinización del agua II, Ósmosis Inversa I. Química Industrial, Universidad de La Laguna, 10-32.

Dinesh, C., 1998. Fluoride and human health-cause for concern. *Ind. J. Environ. Protec.*, 19 (2), 81-89.

Emamjomeh, M. M., Sivakumar, M., 2006. An empirical model for defluoridation by batch monopolar electrocoagulation/flotation (ECF) process. *Journal of Hazardous Materials*, 131, 118-125.

Eawag, (2015) *Geogenic Contamination Handbook – Addressing Arsenic and Fluoride in Drinking Water*. C.A. Johnson, A. Bretzler (Eds.), Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Duebendorf, Switzerland.

Gobierno de Canarias, Sanidad, Dirección General de Aguas.

Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Benoit Marrot, P., 2009. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Journal of Environmental Management*, 43, 2317-2348.

Greenwood, Earnshaw, 1997. *Chemistry of Elements*. Flour.

Hernández Suárez, M., 2006. El flúor en cifras: límites para el consumo y métodos de eliminación. *Boletín informativo trimestral de la Fundación Centro Canario del Agua*, 33, 1-3.

Jaouen, P., Ould Mohamedou, E., Penate Suarez, Pontie, M., D.B., Vince F., 2009. New lives for old reverse osmosis (RO) membranes.

John, D.J. *Water treatment, Handbook of Drinking Water Quality Standards and Controls*, Van Nostrand Reinhold, New York, 407-490.

Macedonio, F., Drioli, E., Guseu, A. A., Bardow, A., Semiat, R., Kurihara, M., 2012. Efficient technologies for worldwide clean water supply. *Science direct*.

Mazet, P. *Les eaux souterraines riches en fluor dans le monde*, Maison des sciences de l'eau de Montpellier,. UMR 5560 Hydrosociences CNRS-UMII- IRD

Mohapata, M., Anand, S., Mishra, B. K., E. Giles, D.E., Singh, P., 2009. Review of fluoride removal from drinkingwater. *Journal of Environmental Management*, 91, 67-77.

Naciones Unidas, “Informe sobre Desarrollo Humano 2006: Más allá de la escasez: Poder, pobreza y crisis mundial del agua”. PNUD, 2006

Organización Mundial de la Salud (OMS), Guidelines for Drinking-water Quality. FOURTH EDITION 2011. (ISBN 978 92 4 154815 1)

Parker, C. I., Fong, C. C., 1975. Fluoride removal technology and cost estimates. Ind. Wastes, 23-25.

Wesley, A., J. Selbin, J. Chem, 1973. Química inorgánica, un enfoque unificado, 306.

World Economic Forum, 2017. La economía del agua cada vez será más importante.

Páginas Webs: (Actualizadas 03/07/2017)

Fluorine: geological information. Disponible en URL:
<https://www.webelements.com/fluorine/geology.html>

LENNTECH, Calculadora del Índice de Saturación Langelier. Disponible en URL:
<http://www.lenntech.es/calculadoras/langelier/langelier.html>

LENNTECH Water Treatment Solutions, Enfermedades transmitidas por el agua – Fluorosis. Disponible en URL: <http://www.lenntech.es/biblioteca/enfermedades/fluorosis/fluorosis.htm>

Organización Mundial de la Salud (OMS), Agua, 2016. Disponible en URL:
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/es/>

Organización Mundial de la Salud (OMS), Agua potable salubre y saneamiento básico en pro de la salud, 2017. Disponible en URL: http://www.who.int/water_sanitation_health/mdg1/es/

Plan Hidrológico de Tenerife, Documentos de Información - Anejos. Disponible en URL:
<http://www.planhidrologicodetenerife.org/esp/descargas.asp>

U.S. Geological Survey's, USGS, The World's Water, 2016. Disponible en URL:
<https://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>

ANEXOS

Anexo I. Estudio con disoluciones sintéticas.

a. Comparación distinta concentración, misma presión.

- Tabla I_a1: Datos experimentales para 2,5 ppm a 4,5 bar.

| t(min) | Q _P (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | R _W (%) | [F] _P (ppm) | [F] _R (ppm) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| 30 | 8,56 | 15,10 | 23,66 | 0,36 | 0,13 | 5,09 |
| 60 | 8,79 | 15,21 | 24,00 | 0,37 | 0,15 | 5,33 |
| 90 | 8,95 | 15,04 | 23,99 | 0,37 | 0,14 | 5,69 |
| 120 | 9,06 | 15,00 | 24,06 | 0,38 | 0,14 | 5,96 |
| 150 | 9,10 | 14,94 | 24,04 | 0,38 | 0,14 | 6,10 |
| 180 | 9,11 | 15,15 | 24,25 | 0,38 | 0,14 | 6,35 |
| 210 | 9,02 | 15,02 | 24,04 | 0,38 | 0,13 | 6,28 |

- Tabla I_a2: Datos experimentales para 5 ppm a 4,5 bar.

| t(min) | Q _P (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | R _W (%) | [F] _P (ppm) | [F] _R (ppm) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| 30 | 8,48 | 11,96 | 20,44 | 0,41 | 0,18 | 7,36 |
| 60 | 9,37 | 12,20 | 21,57 | 0,43 | 0,19 | 7,69 |
| 90 | 9,37 | 12,23 | 21,60 | 0,43 | 0,17 | 7,95 |
| 120 | - | - | - | - | - | - |
| 150 | 9,54 | 12,27 | 21,81 | 0,44 | 0,17 | 7,89 |
| 165 | 9,59 | 12,18 | 21,77 | 0,44 | 0,18 | 7,78 |
| 180 | 9,62 | 12,11 | 21,72 | 0,44 | 0,17 | 7,69 |
| 210 | 9,59 | 12,29 | 21,88 | 0,44 | 0,16 | 7,70 |

- Tabla I_a3: Datos experimentales para 7,5 ppm a 4,5 bar.

| t(min) | Q _P (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | R _W (%) | [F] _P (ppm) | [F] _R (ppm) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| 30 | 9,23 | 11,61 | 20,84 | 0,44 | 0,20 | 11,16 |
| 60 | 9,63 | 11,91 | 21,53 | 0,45 | 0,17 | 11,33 |
| 90 | 9,88 | 11,88 | 21,76 | 0,45 | 0,18 | 11,42 |
| 120 | 10,37 | 12,15 | 22,52 | 0,46 | 0,18 | 11,22 |
| 150 | 11,74 | 13,03 | 24,77 | 0,47 | 0,18 | 11,54 |
| 180 | 12,15 | 12,98 | 25,13 | 0,48 | 0,17 | 11,72 |
| 210 | 12,27 | 13,00 | 25,27 | 0,49 | 0,17 | 11,72 |

b. Comparación misma concentración, distintas presiones.

- Tabla I_b1: Datos experimentales para 5 ppm a 3,5 bar.

| t(min) | Q _P (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | R _W (%) | [F] _P (ppm) | [F] _R (ppm) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| 30 | 7,14 | 17,97 | 25,11 | 0,28 | 0,16 | 5,76 |
| 60 | 7,61 | 20,81 | 28,41 | 0,27 | 0,14 | 4,93 |
| 90 | 7,59 | 22,31 | 29,90 | 0,25 | 0,18 | 4,76 |
| 120 | 7,51 | 21,09 | 28,60 | 0,26 | 0,15 | 4,80 |
| 150 | 7,71 | 21,34 | 29,06 | 0,27 | 0,15 | 4,70 |
| 180 | 7,57 | 21,26 | 28,83 | 0,26 | 0,15 | 4,75 |
| 210 | 7,65 | 21,69 | 29,34 | 0,26 | 0,15 | 4,76 |

- Tabla I_b2: Datos experimentales para 5 ppm a 4 bar.

| t(min) | Q _P (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | R _W (%) | [F] _P (ppm) | [F] _R (ppm) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| 30 | 8,83 | 14,34 | 23,17 | 0,38 | 0,15 | 8,78 |
| 60 | 9,06 | 14,42 | 23,48 | 0,39 | 0,15 | 8,88 |
| 90 | 9,02 | 14,57 | 23,59 | 0,38 | 0,16 | 8,71 |
| 120 | 9,16 | 14,50 | 23,66 | 0,39 | 0,16 | 8,83 |
| 150 | 9,18 | 14,36 | 23,55 | 0,39 | 0,14 | 8,88 |
| 180 | 9,25 | 14,36 | 23,62 | 0,39 | 0,17 | 8,94 |
| 210 | 9,23 | 14,25 | 23,48 | 0,39 | 0,16 | 8,87 |

Anexo II- Estudio con agua de galería de Aguamansa

a. Estudio a 3,5 bar.

- Tabla II_a1: Datos experimentales.

| t(min) | Q _P (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | Recovery (%) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| 30 | 5,29 | 21,09 | 26,39 | 0,20 |
| 120 | 5,53 | 21,82 | 27,35 | 0,20 |
| 180 | 5,65 | 22,36 | 28,01 | 0,20 |

- Tabla II_a2: Análisis químico aniones para el permeado.

| PERMEADO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _P (ppm) | [Cl ⁻] _P (ppm) | [Br ⁻] _P (ppm) | [NO ₃ ⁻] _P (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _P (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _P (ppm) |
| 0,18 | 0,25 | - | 0,06 | - | 1,22 |
| 0,17 | 0,22 | - | 0,28 | - | 1,22 |
| 0,17 | 0,24 | - | 0,06 | - | 1,21 |
| 0,22 | 0,22 | - | 0,07 | - | 1,29 |
| 0,17 | 0,24 | - | 0,07 | - | 1,22 |
| 0,17 | 0,23 | - | 0,06 | - | 1,21 |

- Tabla II_a3: Análisis químico aniones para el rechazo.

| RECHAZO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _R (ppm) | [Cl ⁻] _R (ppm) | [Br ⁻] _R (ppm) | [NO ₃ ⁻] _R (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _R (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _R (ppm) |
| 6,53 | 11,79 | 0,03 | 1,28 | 0,73 | 23,06 |
| 6,50 | 11,99 | 0,03 | 1,16 | 0,80 | 23,85 |
| 6,65 | 12,12 | 0,04 | 1,11 | 0,87 | 23,78 |
| 6,67 | 12,04 | 0,04 | 1,04 | 0,86 | 23,96 |
| 6,64 | 12,13 | 0,04 | 1,00 | 0,89 | 24,14 |
| 6,74 | 12,14 | 0,04 | 0,96 | 0,93 | 24,29 |

- Tabla II_a4: Análisis químico cationes para el permeado.

| PERMEADO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _P (ppm) | [K ⁺] _P (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _P (ppm) |
| 4,95 | - | 0,10 | 0,11 |
| 5,19 | - | -0,02 | -0,06 |
| 5,55 | 1,12 | 0,16 | 0,02 |
| 5,02 | 1,08 | -0,09 | -0,11 |
| 5,02 | 1,10 | 0,07 | 0,32 |
| 5,48 | 1,15 | 0,15 | -0,13 |

- Tabla II_a5: Análisis químico cationes para el rechazo.

| RECHAZO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _R (ppm) | [K ⁺] _R (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _R (ppm) |
| 221,33 | 40,94 | 91,07 | 24,68 |
| 220,63 | 40,82 | 90,47 | 25,16 |
| 223,73 | 41,03 | 91,16 | 26,11 |
| 223,80 | 40,88 | 90,82 | 26,12 |
| 224,44 | 41,04 | 90,89 | 26,76 |
| 225,07 | 41,11 | 91,51 | 27,43 |

b. Estudio a 4,5 bar.

- Tabla II_b1: Datos experimentales.

| t(min) | Q _p (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | Recovery (%) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| 30 | 7,29 | 24,38 | 31,67 | 0,23 |
| 60 | 7,95 | 25,78 | 33,72 | 0,24 |
| 90 | 7,76 | 24,49 | 32,25 | 0,24 |
| 120 | 7,98 | 24,71 | 32,69 | 0,24 |
| 150 | 7,87 | 25,00 | 32,87 | 0,24 |
| 180 | 7,90 | 24,05 | 31,95 | 0,25 |

- Tabla II_b2: Análisis químico aniones para el permeado.

| PERMEADO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _p (ppm) | [Cl ⁻] _p (ppm) | [Br ⁻] _p (ppm) | [NO ₃ ⁻] _p (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _p (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _p (ppm) |
| 0,18 | 0,25 | - | 0,06 | - | 1,22 |
| 0,17 | 0,22 | - | 0,28 | - | 1,22 |
| 0,17 | 0,24 | - | 0,06 | - | 1,21 |
| 0,22 | 0,22 | - | 0,07 | - | 1,29 |
| 0,17 | 0,24 | - | 0,07 | - | 1,22 |
| 0,17 | 0,23 | - | 0,06 | - | 1,21 |

- Tabla II_b3: Análisis químico aniones para el rechazo.

| RECHAZO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _R (ppm) | [Cl ⁻] _R (ppm) | [Br ⁻] _R (ppm) | [NO ₃ ⁻] _R (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _R (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _R (ppm) |
| 6,53 | 11,79 | 0,03 | 1,28 | 0,73 | 23,06 |
| 6,50 | 11,99 | 0,03 | 1,16 | 0,80 | 23,85 |
| 6,65 | 12,12 | 0,04 | 1,11 | 0,87 | 23,78 |
| 6,67 | 12,04 | 0,04 | 1,04 | 0,86 | 23,96 |
| 6,64 | 12,13 | 0,04 | 1,00 | 0,89 | 24,14 |
| 6,74 | 12,14 | 0,04 | 0,96 | 0,93 | 24,29 |

- Tabla II_b4: Análisis químico cationes para el permeado.

| PERMEADO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _P (ppm) | [K ⁺] _P (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _P (ppm) |
| 4,95 | - | 0,10 | 0,11 |
| 5,19 | - | -0,02 | -0,06 |
| 5,55 | 1,12 | 0,16 | 0,02 |
| 5,02 | 1,08 | -0,09 | -0,11 |
| 5,02 | 1,10 | 0,07 | 0,32 |
| 5,48 | 1,15 | 0,15 | -0,13 |

- Tabla II_b5: Análisis químico cationes para el rechazo.

| RECHAZO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _R (ppm) | [K ⁺] _R (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _R (ppm) |
| 221,33 | 40,94 | 91,07 | 24,68 |
| 220,63 | 40,82 | 90,47 | 25,16 |
| 223,73 | 41,03 | 91,16 | 26,11 |
| 223,80 | 40,88 | 90,82 | 26,12 |
| 224,44 | 41,04 | 90,89 | 26,76 |
| 225,07 | 41,11 | 91,51 | 27,43 |

c. Estudio a 5,0 bar.

- Tabla II_c1: Datos experimentales.

| t(min) | Q _P (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | Recovery (%) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| 60 | 7,67 | 24,32 | 31,99 | 0,24 |
| 120 | 7,81 | 24,94 | 32,75 | 0,24 |
| 180 | 7,99 | 24,00 | 31,99 | 0,25 |

- Tabla II_c2: Análisis químico aniones para el permeado.

| PERMEADO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _P (ppm) | [Cl ⁻] _P (ppm) | [Br ⁻] _P (ppm) | [NO ₃ ⁻] _P (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _P (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _P (ppm) |
| 0,13 | 0,28 | - | 0,31 | - | 1,223 |
| 0,13 | 0,26 | - | 0,315 | - | 1,21 |
| 0,13 | 0,25 | - | 0,301 | - | 1,213 |

- Tabla II_c3: Análisis químico aniones para el rechazo.

| RECHAZO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _R (ppm) | [Cl ⁻] _R (ppm) | [Br ⁻] _R (ppm) | [NO ₃ ⁻] _R (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _R (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _R (ppm) |
| 2,015 | 11,956 | 0,034 | 0,952 | 0,733 | 25,738 |
| 2,078 | 12,032 | 0,03 | 0,852 | 0,89 | 25,956 |
| 2,249 | 11,942 | 0,037 | 0,811 | 0,796 | 25,89 |

- Tabla II_c4: Análisis químico cationes para el permeado.

| PERMEADO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _P (ppm) | [K ⁺] _P (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _P (ppm) |
| 5,94 | 1,12 | -0,14 | -0,16 |
| 6,07 | 1,99 | -0,15 | 3,51 |
| 6,30 | 1,18 | -0,20 | -0,04 |

- Tabla II_c5: Análisis químico cationes para el rechazo.

| RECHAZO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _R (ppm) | [K ⁺] _R (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _R (ppm) |
| 220,23 | 41,20 | 89,60 | 19,28 |
| 223,34 | 42,23 | 91,10 | 19,93 |
| 224,40 | 42,41 | 92,08 | 19,74 |

Anexo III- Estudio con agua de galería de Hoya del Cedro

a. Estudio a 3,5 bar.

- Tabla III_a1: Datos experimentales.

| t(min) | Q _P (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | Recovery (%) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| 60 | 4,21 | 21,43 | 25,64 | 0,16 |
| 120 | 4,51 | 21,30 | 25,81 | 0,17 |
| 180 | 4,72 | 21,47 | 26,19 | 0,18 |
| 240 | 4,61 | 21,73 | 26,34 | 0,18 |

- Tabla III_a2: Análisis químico aniones para el permeado.

| PERMEADO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _P (ppm) | [Cl ⁻] _P (ppm) | [Br ⁻] _P (ppm) | [NO ₃ ⁻] _P (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _P (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _P (ppm) |
| 0,25 | 0,71 | - | 0,304 | - | 1,558 |
| 0,25 | 0,70 | - | 0,31 | - | 1,53 |
| 0,30 | 0,69 | - | 0,32 | - | 1,62 |
| 0,26 | 0,78 | - | 0,33 | - | 1,61 |

- Tabla III_a3: Análisis químico aniones para el rechazo.

| RECHAZO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _R (ppm) | [Cl ⁻] _R (ppm) | [Br ⁻] _R (ppm) | [NO ₃ ⁻] _R (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _R (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _R (ppm) |
| 9,84 | 25,67 | 0,06 | 1,26 | 0,62 | 82,32 |
| 9,50 | 24,49 | 0,06 | 1,07 | 0,54 | 78,72 |
| 9,49 | 24,80 | 0,06 | 1,02 | 0,63 | 79,63 |
| 9,05 | 24,62 | 0,06 | 0,96 | 0,65 | 79,55 |

- Tabla III_a4: Análisis químico cationes para el permeado.

| PERMEADO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _P (ppm) | [K ⁺] _P (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _P (ppm) |
| 14,15 | 2,28 | - | -0,17 |
| 12,21 | 1,97 | - | -0,17 |
| 11,85 | 1,91 | - | -0,05 |
| 12,56 | 1,93 | - | 2,21 |

- Tabla III_a5: Análisis químico cationes para el rechazo.

| RECHAZO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _R (ppm) | [K ⁺] _R (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _R (ppm) |
| 477,89 | 79,08 | 94,89 | 31,02 |
| 454,59 | 75,05 | 90,64 | 29,89 |
| 452,63 | 74,50 | 90,10 | 29,49 |
| 460,81 | 76,30 | 92,32 | 29,99 |

b. Estudio a 4,5 bar.

- Tabla III_b1: Datos experimentales.

| t(min) | Q _P (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | Recovery (%) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| 60 | 4,40 | 16,62 | 21,01 | 0,21 |
| 120 | 5,24 | 16,41 | 21,66 | 0,24 |
| 180 | 5,23 | 16,54 | 21,77 | 0,24 |
| 240 | 5,21 | 15,95 | 21,16 | 0,25 |

- Tabla III_b2: Análisis químico aniones para el permeado.

| PERMEADO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _P (ppm) | [Cl ⁻] _P (ppm) | [Br ⁻] _P (ppm) | [NO ₃ ⁻] _P (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _P (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _P (ppm) |
| 0,52 | 1,75 | - | 0,34 | - | 2,68 |
| 0,37 | 0,96 | - | 0,32 | - | 1,75 |
| 0,36 | 1,02 | - | 0,33 | - | 1,75 |
| 0,36 | 1,15 | - | 0,33 | - | 1,76 |

- Tabla III_b3: Análisis químico aniones para el rechazo.

| RECHAZO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _R (ppm) | [Cl ⁻] _R (ppm) | [Br ⁻] _R (ppm) | [NO ₃ ⁻] _R (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _R (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _R (ppm) |
| 4,92 | 18,01 | 0,06 | 1,08 | 1,46 | 138,53 |
| 12,99 | 33,78 | 0,08 | 1,12 | 0,93 | 111,37 |
| 13,26 | 34,10 | 0,08 | 1,05 | 1,06 | 113,44 |
| 13,19 | 34,15 | 0,09 | 1,02 | 1,19 | 113,77 |

- Tabla III_b4: Análisis químico cationes para el permeado.

| PERMEADO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _P (ppm) | [K ⁺] _P (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _P (ppm) |
| 22,47 | 3,55 | - | -0,17 |
| 16,25 | 2,51 | - | - |
| 16,03 | 2,46 | - | - |
| 16,69 | 2,65 | - | -0,16 |

- Tabla II_b5: Análisis químico cationes para el rechazo.

| RECHAZO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _R (ppm) | [K ⁺] _R (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _R (ppm) |
| 734,38 | 119,49 | 128,30 | 50,34 |
| 573,17 | 93,80 | 99,35 | 39,40 |
| 583,49 | 95,30 | 100,93 | 42,64 |
| 581,91 | 94,97 | 100,91 | 40,13 |

c. Estudio a 5,0 bar.

- Tabla III_c1: Datos experimentales.

| t(min) | Q _P (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | Recovery (%) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| 60 | 5,78 | 12,43 | 18,21 | 0,32 |
| 120 | 5,75 | 12,51 | 18,27 | 0,31 |
| 180 | 5,86 | 11,99 | 17,85 | 0,33 |

- Tabla III_c2: Análisis químico aniones para el permeado.

| PERMEADO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _P (ppm) | [Cl ⁻] _P (ppm) | [Br ⁻] _P (ppm) | [NO ₃ ⁻] _P (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _P (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _P (ppm) |
| 0,38 | 1,11 | - | 0,332 | - | 1,896 |
| 0,36 | 1,13 | - | 0,298 | - | 1,863 |
| 0,37 | 1,15 | - | 0,33 | - | 1,883 |

- Tabla III_c3: Análisis químico aniones para el rechazo.

| RECHAZO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _R (ppm) | [Cl ⁻] _R (ppm) | [Br ⁻] _R (ppm) | [NO ₃ ⁻] _R (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _R (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _R (ppm) |
| 14,348 | 36,438 | 0,086 | 0,86 | 1,251 | 122,981 |
| 14,622 | 37,951 | 0,09 | 0,847 | 1,438 | 127,237 |
| 14,791 | 38,273 | 0,09 | 0,86 | 1,418 | 128,792 |

- Tabla II_c4: Análisis químico cationes para el permeado.

| PERMEADO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _P (ppm) | [K ⁺] _P (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _P (ppm) |
| 16,35 | 2,37 | 0,29 | 0,22 |
| 16,46 | 2,32 | 0,18 | 0,06 |
| 17,14 | 2,34 | 0,56 | 7,23 |

- Tabla II_c5: Análisis químico cationes para el rechazo.

| RECHAZO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _R (ppm) | [K ⁺] _R (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _R (ppm) |
| 684,06 | 112,13 | 117,89 | 37,15 |
| 692,54 | 113,50 | 120,08 | 47,24 |
| 713,23 | 116,87 | 123,04 | 23,81 |

Anexo IV- Estudio con agua de Hoya del Cedro en varias etapas

a. Estudio Etapa I.

- Tabla IV_a1: Datos experimentales.

| t(min) | Q _p (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | Recovery (%) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| 10 | 5,60 | 9,38 | 14,98 | 0,37 |
| 20 | 5,03 | 9,63 | 14,66 | 0,34 |
| 30 | 4,76 | 12,16 | 16,92 | 0,28 |
| 40 | 4,85 | 12,36 | 17,20 | 0,28 |
| 50 | 4,72 | 12,05 | 16,78 | 0,28 |

- Tabla IV_a2: Análisis químico aniones para el permeado.

| PERMEADO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _P (ppm) | [Cl ⁻] _P (ppm) | [Br ⁻] _P (ppm) | [NO ₃ ⁻] _P (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _P (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _P (ppm) |
| 0,23 | 0,87 | - | 0,056 | - | 2,976 |
| 0,26 | 1,12 | - | 0,09 | - | 3,19 |
| 0,26 | 1,07 | - | 0,08 | - | 3,12 |
| 0,27 | 1,11 | - | 0,10 | - | 3,11 |
| 0,27 | 1,16 | - | 0,11 | - | 3,12 |

- Tabla IV_a3: Análisis químico aniones para el rechazo.

| RECHAZO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _R (ppm) | [Cl ⁻] _R (ppm) | [Br ⁻] _R (ppm) | [NO ₃ ⁻] _R (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _R (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _R (ppm) |
| 12,81 | 32,93 | 0,08 | 1,19 | - | 113,86 |
| 15,04 | 38,71 | 0,10 | 1,70 | - | 130,46 |
| 14,24 | 37,60 | 0,10 | 1,93 | - | 123,67 |
| 14,48 | 37,59 | 0,09 | 2,06 | - | 123,89 |
| 4,629 | 37,69 | 0,10 | 2,23 | - | 124,50 |

- Tabla IV_a4: Análisis químico cationes para el permeado.

| PERMEADO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _P (ppm) | [K ⁺] _P (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _P (ppm) |
| 10,89 | 1,96 | 0,44 | -0,88 |
| 16,57 | 2,15 | 0,37 | -0,64 |
| 17,14 | 2,16 | 0,42 | -0,83 |
| 17,31 | 2,32 | 0,22 | -0,68 |
| 17,56 | 2,29 | 0,55 | -0,92 |

- Tabla III_a5: Análisis químico cationes para el rechazo.

| RECHAZO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _R (ppm) | [K ⁺] _R (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _R (ppm) |
| 587,70 | 89,12 | 85,34 | 24,77 |
| 696,83 | 108,76 | 102,76 | 30,87 |
| 649,03 | 100,47 | 93,58 | 27,99 |
| 666,27 | 103,39 | 97,02 | 29,46 |
| 656,46 | 101,23 | 94,35 | 28,45 |

b. Estudio Etapa II.

- Tabla IV_b1: Datos experimentales.

| t(min) | Q _P (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | Recovery (%) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| 0 | - | - | - | - |
| 10 | 4,67 | 12,75 | 17,42 | 0,27 |
| 20 | 4,44 | 13,11 | 17,55 | 0,25 |
| 30 | 4,05 | 16,22 | 20,27 | 0,20 |
| 40 | 4,18 | 15,10 | 19,29 | 0,22 |

- Tabla IV_b2: Análisis químico aniones para el permeado.

| PERMEADO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _P (ppm) | [Cl ⁻] _P (ppm) | [Br ⁻] _P (ppm) | [NO ₃ ⁻] _P (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _P (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _P (ppm) |
| 0,35 | 1,32 | - | 0,089 | - | 3,226 |
| 0,42 | 1,59 | - | 0,10 | - | 3,45 |
| 0,44 | 1,55 | - | 0,11 | - | 3,42 |
| 0,41 | 1,61 | - | 0,11 | - | 3,41 |

- Tabla IV_b3: Análisis químico aniones para el rechazo.

| RECHAZO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _R (ppm) | [Cl ⁻] _R (ppm) | [Br ⁻] _R (ppm) | [NO ₃ ⁻] _R (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _R (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _R (ppm) |
| 15,61 | 42,50 | 0,10 | 1,97 | - | 139,63 |
| 17,53 | 47,43 | 0,12 | 1,97 | - | 157,20 |
| 16,84 | 44,96 | 0,11 | 1,88 | - | 149,34 |
| 17,57 | 45,30 | 0,12 | 1,92 | - | 150,47 |

- Tabla IV_b4: Análisis químico cationes para el permeado.

| PERMEADO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _P (ppm) | [K ⁺] _P (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _P (ppm) |
| 660,84 | 110,48 | 102,14 | 34,65 |
| 22,67 | 3,89 | 1,50 | 1,64 |
| 24,79 | 3,95 | 1,00 | 1,15 |
| 24,27 | 3,91 | 1,49 | 36,13 |
| 24,36 | 3,51 | 0,79 | 1,13 |

Tabla III_a5: Análisis químico cationes para el rechazo.

| RECHAZO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _R (ppm) | [K ⁺] _R (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _R (ppm) |
| 790,90 | 131,04 | 123,06 | 41,86 |
| 886,05 | 147,34 | 139,73 | 45,31 |
| 822,40 | 136,90 | 124,74 | 41,36 |
| 822,29 | 136,69 | 123,46 | 34,36 |

c. Estudio Etapa III.

- Tabla IV_c1: Datos experimentales.

| t(min) | Q _P (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | Recovery (%) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| 10 | 4,45 | 12,69 | 17,14 | 0,26 |
| 20 | 3,93 | 12,90 | 16,83 | 0,23 |
| 30 | 3,79 | 12,57 | 16,36 | 0,23 |

- Tabla IV_c2: Análisis químico aniones para el permeado.

| PERMEADO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _P (ppm) | [Cl ⁻] _P (ppm) | [Br ⁻] _P (ppm) | [NO ₃ ⁻] _P (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _P (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _P (ppm) |
| 0,48 | 1,10 | - | 0,051 | - | 3,04 |
| 0,59 | 1,96 | - | 0,10 | - | 3,85 |
| 0,60 | 2,24 | - | 0,09 | - | 3,89 |

- Tabla IV_c3: Análisis químico aniones para el rechazo.

| RECHAZO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _R (ppm) | [Cl ⁻] _R (ppm) | [Br ⁻] _R (ppm) | [NO ₃ ⁻] _R (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _R (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _R (ppm) |
| 15,28 | 39,72 | 0,09 | 1,13 | - | 135,53 |
| 19,81 | 53,46 | 0,13 | 1,73 | - | 180,36 |
| 20,20 | 53,95 | 0,13 | 1,85 | - | 182,29 |

- Tabla IV_c4: Análisis químico cationes para el permeado.

| PERMEADO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _P (ppm) | [K ⁺] _P (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _P (ppm) |
| 17,04 | 3,27 | 2,30 | 1,38 |
| 27,77 | 4,42 | 1,52 | 1,37 |
| 30,24 | 4,77 | 1,16 | 1,58 |

- Tabla IV_c5: Análisis químico cationes para el rechazo.

| RECHAZO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _R (ppm) | [K ⁺] _R (ppm) | [Mg ²⁺] _R (ppm) | [Ca ²⁺] _R (ppm) |
| - | - | - | - |
| 992,45 | 163,42 | 152,26 | 45,22 |
| 1014,13 | 168,40 | 156,28 | 46,28 |

d. Estudio Etapa IV.

- Tabla IV_d1: Datos experimentales.

| t(min) | Q _P (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | Recovery (%) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| 10 | 4,24 | 7,44 | 11,68 | 0,36 |
| 20 | 3,36 | 10,56 | 13,92 | 0,24 |
| 30 | 3,12 | 10,63 | 13,75 | 0,23 |

- Tabla IV_d2: Análisis químico aniones para el permeado.

| PERMEADO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _P (ppm) | [Cl ⁻] _P (ppm) | [Br ⁻] _P (ppm) | [NO ₃ ⁻] _P (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _P (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _P (ppm) |
| 0,62 | 1,75 | 0,015 | 0,092 | - | 3,607 |
| 0,59 | 1,96 | - | 0,10 | - | 3,82 |
| 0,71 | 2,85 | - | 0,14 | - | 4,47 |

- Tabla IV_d3: Análisis químico aniones para el rechazo.

| RECHAZO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F ⁻] _R (ppm) | [Cl ⁻] _R (ppm) | [Br ⁻] _R (ppm) | [NO ₃ ⁻] _R (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _R (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _R (ppm) |
| 17,62 | 45,75 | 0,11 | 1,33 | - | 154,91 |
| 20,19 | 53,69 | 0,13 | 1,55 | - | 185,77 |
| 17,60 | 60,28 | 0,14 | 1,73 | - | 206,55 |

- Tabla IV_d4: Análisis químico cationes para el permeado.

| PERMEADO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _P (ppm) | [K ⁺] _P (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _P (ppm) |
| 27,08 | 4,74 | 2,69 | 1,63 |
| 28,22 | 4,36 | 1,59 | 1,18 |
| 37,74 | 5,73 | 1,30 | 1,40 |

- Tabla IV_d5: Análisis químico cationes para el rechazo.

| RECHAZO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _R (ppm) | [K ⁺] _R (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _R (ppm) |
| 867,13 | 146,68 | 134,81 | 42,17 |
| 1024,35 | 169,30 | 154,90 | 25,57 |
| 1122,34 | 187,08 | 176,15 | 60,14 |

a. Estudio Etapa V.

- Tabla IV_e1: Datos experimentales.

| t(min) | Q _P (l/h) | Q _R (l/h) | Q _B (l/h) | Recovery (%) |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| 7 | 4,77 | 10,21 | 14,98 | 0,32 |
| 14 | 3,35 | 13,48 | 16,84 | 0,20 |
| 23 | 2,98 | 16,12 | 19,10 | 0,16 |

- Tabla IV_e2: Análisis químico aniones para el permeado.

| PERMEADO | | | | | |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F] _P (ppm) | [Cl] _P (ppm) | [Br] _P (ppm) | [NO ₃] _P (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _P (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _P (ppm) |
| 0,39 | 1,46 | - | 0,071 | - | 3,26 |
| 0,42 | 1,55 | - | 0,08 | - | 3,35 |
| 0,476 | 1,806 | - | 0,08 | - | 3,515 |

- Tabla IV_e3: Análisis químico aniones para el rechazo.

| RECHAZO | | | | | |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| [F] _R (ppm) | [Cl] _R (ppm) | [Br] _R (ppm) | [NO ₃] _R (ppm) | [PO ₄ ³⁻] _R (ppm) | [SO ₄ ²⁻] _R (ppm) |
| 15,61 | 40,753 | 0,10 | 1,01 | - | 140,22 |
| 19,59 | 52,80 | 0,13 | 1,24 | - | 179,78 |
| 18,42 | 48,138 | 0,114 | 1,294 | - | 164,736 |

- Tabla IV_e4: Análisis químico cationes para el permeado.

| PERMEADO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _P (ppm) | [K ⁺] _P (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _P (ppm) |
| 21,21 | 3,93 | 1,31 | 1,03 |
| 22,41 | 3,67 | 0,90 | 0,90 |
| 34,76 | 5,38 | 0,81 | 1,45 |

- Tabla IV_e5: Análisis químico cationes para el rechazo.

| RECHAZO | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| [Na ⁺] _R (ppm) | [K ⁺] _R (ppm) | [Mg ²⁺] _P (ppm) | [Ca ²⁺] _R (ppm) |
| 758,83 | 125,80 | 115,71 | 35,38 |
| 934,54 | 154,52 | 144,62 | 23,44 |
| 1081,57 | 179,43 | 167,65 | 25,89 |