



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**PRETRATAMIENTO DEL PROCESO DE ÓSMOSIS
INVERSA PARA LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR
CON UNA PLANTA PILOTO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL-AGUA

P R E S E N T A

OSWALDO CERÓN ALFARO

TUTORA:

DRA. ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: M.C. Leal Ascencio María Teresa
Secretario: Dr. Pandiyan S. Thangarasu
Vocal: Dra. Ramírez Zamora Rosa María
1er. Suplente: M.I. Silva Martínez Ana Elisa
2do. Suplente: Dra. Bernal González Marisela

Lugar donde se realizó la tesis:
Instituto de Ingeniería, UNAM

TUTORA DE TESIS:

Dra. Ramírez Zamora Rosa María



DEDICATORIAS

A DIOS:

Gracias por iluminar el camino hacia otro sueño más que ahora se ha vuelto realidad y permitirme compartirlo con todos mis seres queridos.

A MIS PADRES: ALTAGRACIA Y ROBERTO

Gracias por permitirme ser alguien en la vida y este nuevo logro es especialmente para ustedes, pero sobre todo gracias por creer en mí.

A MI SEGUNDA MADRE: CONCEPCION GUZMAN

Gracias por las inolvidables bendiciones, por todo lo que significó en vida para mí, donde quiera que se encuentre “que dios la bendiga”.

A MIS HERMANOS: JAVIER, ROBERTO, EDUARDO, ELIZABETH

Gracias por el apoyo otorgado para la realización de otro sueño más, pero principalmente gracias por seguir al pendiente de nuestros padres.

A MI PAREJA: YOLANDA GARCIA

Gracias por ser la mujer y compañera en mi vida, siento no ser el hombre que tú mereces pero al menos quiero que te sientas orgullosa del hombre que esta contigo.

A MIS SOBRINOS: ALEJANDRA, ANA, GUADALUPE, JANET, PAOLA, ZULEIMA, ALDO, EDUARDO, GREGORIO, ROBERTO

Gracias por su apoyo y espero algún día valoren el esfuerzo de sus padres por hacer de ustedes unos seres de bien, sólo y únicamente para su bien.

A UN GRAN AMIGO: LAZARO

Gracias por ser esa persona en la cual se puede confiar, pero principalmente gracias por cuidar a mis padres, algún día pagaré esa deuda contigo.

Nuevamente, esto es por y gracias a ustedes

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Rosa María Ramírez Zamora por darme nuevamente la oportunidad de continuar superándome y por el gran apoyo recibido durante la elaboración de este proyecto.

Al Instituto de Ingeniería UNAM y proyecto IMPULSA, por las facilidades otorgadas para la realización de este proyecto.

Al Programa de Becas del Instituto de Ingeniería (PBII) y el proyecto IMPULSA por el financiamiento para este proyecto.

A mi jurado M. C. Leal Ascencio María teresa, Dr. Pandiyan S. Thangarasu, Dra. Ramírez Zamora Rosa María, M. I. Silva Martínez Ana Elisa y Dra. Bernal González Marisela por sus valiosas aportaciones a mi proyecto de tesis.

A mi selecto y prestigiado grupo de amigas: Esperanza Gil, Kitzia Gutiérrez, Myriam Solís, Thalía Huanosta y Vanessa Redondo; muchas gracias a todas por esos buenos momentos, pero principalmente gracias por haber estado conmigo en los momentos más difíciles de mi vida, gracias a dios que nos unió cuando más necesitábamos de un amigo con quien platicar y confiar. De todo corazón y con todo el “respeto” que siempre les he tenido quiero decirles que las quiero mucho y pueden contar conmigo siempre.

A los ingenieros Alejandro Ortiz y Walter García por el apoyo y esfuerzo otorgado para la realización de este proyecto.

A la Dra. Nathalie Cabirol, Fabricio Espejel y Marcelo Rojas por el apoyo, pero principalmente por su amistad.

A todos mis amigos que conforman el “Dvo. 18” por los grandes momentos vividos, que en lo personal, han sido los mejores de mi vida.

Mil Gracias

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
OBJETIVOS.....	4
CAPÍTULO 1. ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO.....	5
1.1. PROCESO DE DESALACIÓN.....	5
1.1.1. Generalidades del proceso de desalación.....	5
1.1.2. Demanda prevista para el proceso de desalación.....	7
1.1.3. Comparación de tecnologías del proceso de desalación.....	8
1.1.4. Otras aplicaciones del proceso de desalación.....	9
1.1.5. Situación actual del proceso de desalación en México.....	10
1.2. PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA.....	12
1.2.1. Generalidades del proceso de ósmosis inversa.....	12
1.2.2. Clasificación de membranas para el proceso de ósmosis inversa.....	13
1.2.3. Configuraciones de membranas para el proceso de ósmosis inversa.....	13
1.2.3.1. Membranas de tipo plano.....	14
1.2.3.2. Membranas tubulares.....	14
1.2.3.3. Membranas de fibra hueca.....	15
1.2.3.4. Membranas de enrollamiento en espiral.....	16
1.2.4. Características de las membranas para proceso de ósmosis inversa.....	17
1.2.4.1. Rechazo de contaminantes.....	17
1.2.4.2. Resistencia al cloro.....	19
1.2.4.3. Condiciones hidráulicas.....	19
1.2.4.4. Carga electroforética.....	20
1.2.4.5. Concentración de polarización.....	20
1.2.5. Instalación de las membranas para proceso de ósmosis inversa.....	21
1.3. Parámetros de influencia del proceso de ósmosis inversa.....	24
1.3.1. Presión.....	24

1.3.2.	Temperatura.....	25
1.3.3.	Membranas de desalación.....	25
1.3.4.	Calidad del agua a tratar.....	27
1.3.4.1.	Características del agua de mar para proceso de desalación.....	27
1.3.4.1.1.	Salinidad del agua de mar.....	28
1.3.4.1.2.	Composición química del agua de mar.....	29
1.3.4.1.3.	pH.....	30
1.3.4.2.	Procesos de pre y post-tratamiento de la ósmosis inversa para la desalación de agua de mar.....	30
1.3.4.2.1.	Filtración.....	33
1.3.4.2.2.	Ajuste de pH al agua cruda de mar.....	38
1.3.4.2.3.	Desinfección.....	39
1.3.4.2.4.	Coagulación-Floculación.....	40
1.3.4.2.5.	Decloración.....	42
1.3.4.2.6.	Inhibición.....	42
1.3.4.2.7.	Filtros de membranas.....	42
1.3.4.2.8.	Ajuste de pH al agua producto o permeado.....	44
1.3.4.2.9.	Post-cloración.....	45
1.4.	Residuos generados por el proceso de ósmosis inversa.....	45
1.4.1.	Descarga a un cuerpo de agua superficial.....	45
1.4.2.	Inyección profunda.....	46
1.4.3.	Descarga en instalación sanitaria.....	46
1.4.4.	Aplicación en suelo.....	46
1.4.5.	Lagunas de evaporización.....	46
1.5.	Normatividad de agua potable.....	48
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO PARA PRETRATAMIENTO DE AGUA DE MAR.....		49
2.1.	Agua de mar.....	49
2.1.1.	Muestreo y caracterización de agua de mar.....	49

2.1.2. Preselección de dos tipos de pretratamiento y el post-tratamiento del proceso de ósmosis inversa para la desalación de agua de mar.....	49
2.1.3. Pruebas de laboratorio para la determinación de los reactivos y sus dosis a utilizar en las etapas de los dos pretratamientos y el post-tratamiento del proceso de ósmosis inversa en planta piloto.....	52
2.1.3.1. Ajuste de pH al agua de mar cruda.....	53
2.1.3.2. Precloración.....	53
2.1.3.3. Coagulación-floculación.....	54
2.1.3.4. Decloración.....	54
2.1.3.5. Ajuste de pH al agua producto o permeado.....	54
2.1.3.6. Post-cloración.....	55
2.1.4. pruebas de pretratamiento en una planta piloto de desalación por ósmosis inversa como proceso principal.....	55
2.1.4.1. Diseño de una planta piloto de desalación por ósmosis inversa.....	55
2.1.4.2. Instalación de una planta piloto de desalación por ósmosis inversa.....	58
2.1.4.3. Realización de pruebas de pretratamiento en una planta piloto de desalación por ósmosis inversa como proceso principal.....	61
2.1.4.3.1. Ajuste de pH al agua de mar cruda.....	61
2.1.4.3.2. Precloración.....	61
2.1.4.3.3. Coagulación-floculación.....	61
2.1.4.3.4. Decloración.....	62
2.1.4.4. Técnicas analíticas y experimentales.....	63
2.1.4.4.1. Técnicas analíticas.....	63
➤ Índice de Densidad de Ensuciamiento (IDE).....	63
➤ pH.....	64
➤ Color.....	64
➤ Turbiedad.....	64
➤ Conductividad Eléctrica.....	64
➤ Cloro residual.....	64
2.1.4.4.2. Técnicas experimentales.....	65

➤ Coagulación-floculación.....	65
2.1.5. Determinación del pretratamiento más económico de los dos determinados con base en una estimación de costos de reactivos y materiales.....	65
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	66
3.1. Muestreo y caracterización de agua de mar.....	66
3.2. Preselección de dos tipos de pretratamiento y el post-tratamiento del proceso de ósmosis inversa para la desalación de agua de mar.....	68
3.3. Pruebas de laboratorio para la determinación de los reactivos y sus dosis a utilizar en las etapas de los dos pretratamientos y el post-tratamiento del proceso de ósmosis inversa en planta piloto.....	68
3.3.1. Pruebas de laboratorio al agua de mar cruda de período no vacacional.....	68
3.3.1.1. Ajuste de pH al agua de mar cruda para los dos pretratamientos evaluados.....	68
3.3.1.2. Precloración del agua de mar para el pretratamiento de filtración directa.....	69
3.3.1.3. Coagulación-Floculación para el pretratamiento de CFF.....	70
3.3.1.4. Precloración del agua de mar para el pretratamiento CFF.....	71
3.3.2. Pruebas de laboratorio al agua de mar cruda de período vacacional.....	72
3.3.2.1. Pruebas de laboratorio para pretratamiento de filtración directa.....	72
3.3.2.2. Pruebas de laboratorio para pretratamiento coagulación-floculación-filtración.....	73
3.3.3. Pruebas de laboratorio para el post-tratamiento al agua producto o permeado del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	76
3.4. Resultados de pruebas en la planta piloto con pretratamientos preseleccionados y un sistema de ósmosis inversa.....	77
3.4.1. Pruebas en planta piloto con el pretratamiento de filtración directa en la planta piloto de ósmosis inversa.....	77
3.4.2. Pruebas en planta piloto con el pretratamiento de coagulación-floculación-filtración y sistema de ósmosis inversa.....	83
3.5. Selección del mejor pretratamiento a aplicar, de los dos preseleccionados, con base en la comparación de valores de parámetros determinados en pretratamientos (IDE, turbiedad, color, etc.).....	90
3.6. Determinación del pretratamiento más económico de los dos determinados con base en una estimación de costos de reactivos y materiales.....	97
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	101

REFERENCIAS.....	102
ANEXOS.....	106
Anexo A. Elementos contenidos en el agua de mar, su origen o las causas que provocan su presencia en el agua y efectos.....	106
Anexo B. Descripción del sistema de retrolavado de filtros.....	111
Anexo C. Descripción de filtros precapa y especiales.....	112
Anexo D. Procesos no convencionales de desinfección.....	113
Anexo E. Otros pretratamientos para problemas específicos de contaminación.....	115
Anexo F. Reactivos y dosis aplicadas en plantas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa para cada etapa del pretratamiento a nivel mundial.....	116
Anexo G. Procedimiento para preparación del agua de mar sintética.....	117
Anexo H. Cálculo para la determinación del Índice de Densidad de Ensuciamiento (IDE) (Silt Density Index (SDI)).....	118
Anexo I. Comportamiento del pH con respecto a dosis de H ₂ SO ₄ y HCl 0.1N agregado al agua de mar.....	119
Anexo J. Resultados de pruebas en laboratorio de la etapa precloración con un intervalo de dosis de 0-10 mg/L.....	120
Anexo K. Resultados de dosificación de coagulantes (0-10 mg/L) al agua de mar.....	121
Anexo L. Resultados de caracterización e IDE <i>in situ</i> para la simulación del pretratamiento de filtración directa en planta piloto de ósmosis inversa (abril 2009).....	124
Anexo M. Resultados de pruebas de jarras realizadas <i>in situ</i> en período vacacional (abril 2009).....	125
Anexo N. Procedimiento para la dosificación necesaria para eliminar el cloro residual libre con bisulfito de sodio.....	127
Anexo O. Resultados de caracterización e IDE <i>in situ</i> para la simulación del pretratamiento de coagulación-floculación-filtración en planta piloto de ósmosis inversa (abril 2009).....	128

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Tecnologías aplicadas en desalación (Fritzmann <i>et al.</i> , 2007).....	5
Tabla 1.2. Clasificación de los procesos de desalación (Porteous, 1975; AWWA, 2004; Fritzmann <i>et al.</i> , 2007; US Department of the Interior, 2003).....	5
Tabla 1.3. Comparación de características de tres tecnologías de desalación (Medina, 2000)..	9
Tabla 1.4. Situación actual de la desalación en México (IDA, 2006).....	10
Tabla 1.5. Porcentaje promedio de rechazo de iones según el tipo de membranas (Medina, 2000).....	18
Tabla 1.6. Rechazos promedios de compuestos orgánicos por membranas de poliamida y acetato de celulosa (Medina, 2000).....	19
Tabla 1.7. Espectro de salinidades de diferentes tipos de agua.....	28
Tabla 1.8. Análisis de aguas de mar (Fritzmann <i>et al.</i> , 2007; Lenntech, 2008; Medina, 2000).....	29
Tabla 1.9. Límites permisibles de características físicas y organolépticas.....	48
Tabla 1.10. Límites permisibles para agua de uso y consumo humano NOM-127-SSA1-1994....	48
Tabla 2.1. Pretratamientos aplicados a la ósmosis inversa para la desalación del agua de mar y su eficiencia para la remoción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.....	50
Tabla 2.2. Promedio de dosis aplicadas e intervalos de los reactivos aplicados en las etapas del pretratamiento integrado por los procesos de coagulación-floculación y filtración dual para desalación de agua de mar por OI.....	52
Tabla 2.3. Costos de reactivos e insumos para la estimación de costos de pretratamientos aplicados en planta piloto de desalación por OI.....	65
Tabla 3.1. Caracterización de agua de mar comparada con lo reportado a nivel mundial.....	66
Tabla 3.2. Recomendaciones para valores de IDE ₁₅ de agua a tratar por OI (Lenntech, 2008).....	67
Tabla 3.3. Valores promedio de IDE del agua de mar cruda en estudio en diferentes períodos de muestreo.....	67
Tabla 3.4. Mejores reactivos y dosis a aplicar en las etapas del pretratamiento CCF de la planta piloto de OI con base en pruebas en laboratorio al agua de mar de período vacacional.....	75
Tabla 3.5. Estimación de costos para el pretratamiento de filtración directa aplicado en la planta piloto de desalación por OI.....	98
Tabla 3.6. Estimación de costos para el pretratamiento de coagulación-floculación-filtración aplicado en la planta piloto de desalación por OI.....	98
Tabla 3.7. Comparación de estimación de costos para los dos tipos de pretratamientos aplicados en planta piloto de desalación por OI.....	99

Tabla 3.8. Comparación de costos del mejor pretratamiento obtenido en este estudio con los costos reportados para proceso de ósmosis inversa a nivel mundial.....	100
Tabla F.1. Reactivos y dosis aplicadas en plantas de desalación de ósmosis inversa a nivel mundial.....	116
Tabla I.1. Comportamiento de pH con respecto a dosis de H ₂ SO ₄ y HCl 0.1N agregado al agua de mar (abril 2009).....	119
Tabla J.1. Determinación del cloro residual para la precloración a media hora.....	120
Tabla J.2. Valores de cloro residual para la precloración a media y dos horas con intervalo de dosis de cloro de 1-3.5 mg/L.....	120
Tabla K.1. Dosis de FeCl ₃ (0-10 mg/L) aplicadas al agua en estudio (febrero de 2009) y parámetros de calidad.....	121
Tabla K.2. Dosis de PAX-29 (0-10 mg/L) aplicadas al agua en estudio (febrero de 2009) y parámetros de calidad.....	121
Tabla K.3. Dosis de Al ₂ (SO ₄) ₃ (0-10 mg/L) aplicadas al agua en estudio (febrero de 2009) y parámetros de calidad.....	121
Tabla K.4. Dosis de FeCl ₃ en intervalo menor (1-4.5 mg/L) aplicadas al agua en estudio (febrero de 2009) y parámetros de calidad.....	123
Tabla K.5. Dosis de PAX-29 en intervalo menor (1-6 mg/L) aplicadas al agua en estudio (febrero de 2009) y parámetros de calidad.....	123
Tabla K.6. Dosis de Al ₂ (SO ₄) ₃ en intervalo menor (1-3 mg/L) aplicadas al agua en estudio (febrero de 2009) y parámetros de calidad.....	123
Tabla L.1. Resultados de caracterización del agua de mar y valores de IDE obtenidos para pretratamiento preseleccionado filtración directa aplicado <i>in situ</i> (abril 2009).....	124
Tabla M.1. Resultados de pruebas de jarras aplicando HCl+NaOCl+FeCl ₃ al agua de mar (abril de 2009).....	125
Tabla M.2. Resultados de pruebas de jarras aplicando HCl+NaOCl+Al ₂ (SO ₄) ₃ al agua de mar (abril de 2009).....	125
Tabla M.3. Resultados de pruebas de jarras aplicando H ₂ SO ₄ +NaOCl+FeCl ₃ al agua de mar (abril de 2009).....	126
Tabla M.4. Resultados de pruebas de jarras aplicando H ₂ SO ₄ +NaOCl+Al ₂ (SO ₄) ₃ al agua de mar (abril de 2009).....	126
Tabla O.1. Resultados de caracterización del agua de mar y valores de IDE obtenidos para pretratamiento preseleccionado coagulación-floculación-filtración aplicado <i>in situ</i> (abril 2009).....	128
Tabla O.2. Resultados de caracterización del agua de mar y valores de IDE obtenidos para pretratamiento preseleccionado coagulación-floculación-filtración aplicado <i>in situ</i> (abril 2009) (continuación).....	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribución de los procesos de desalación a nivel mundial (Wolff, 2006; Zhou y Tol, 2005).....	6
Figura 1.2. Distribución de la capacidad de plantas de desalación alrededor del mundo (Wangnick, 2002).....	7
Figura 1.3. Crecimiento previsto de las capacidades de la desalación alrededor del mundo (Inteligencia Global del Agua, 2005).....	8
Figura 1.4. Distribución del proceso de desalación en México (Fuentes y Ramírez, 2003).....	11
Figura 1.5. Usos para plantas desaladoras en México (Fuentes y Ramírez, 2003).....	11
Figura 1.6. Principios del proceso de ósmosis (Medina, 2000).....	12
Figura 1.7. Principios del proceso de ósmosis inversa (Medina, 2000).....	12
Figura 1.8. Membranas de tipo plano (Medina, 2000).....	14
Figura 1.9. Membranas tubulares (Medina, 2000).....	15
Figura 1.10. Membranas de fibra hueca (emalsa, 2007).....	16
Figura 1.11. Membranas de enrollamiento en espiral (Medina, 2000).....	17
Figura 1.12. Instalación de simple etapa (Medina, 2000).....	22
Figura 1.13. Instalación de etapas de salmuera (Medina, 2000).....	23
Figura 1.14. Instalación de etapas de producto (Medina, 2000).....	24
Figura 1.15. Tren de tratamiento convencional coagulación-floculación-filtración para proceso de ósmosis inversa (Aboabboud <i>et al.</i> , 2007; Fritzmann <i>et al.</i> , 2007; Koutsakos <i>et al.</i> , 2007; Khawaji <i>et al.</i> , 2007).....	31
Figura 1.16. Tren de tratamiento convencional filtración directa para proceso de ósmosis inversa (Elguera <i>et al.</i> , 2005; Pais <i>et al.</i> , 2007).....	32
Figura 1.17. Filtro abierto rectangular (Cerón, 2006).....	35
Figura 1.18. Tipos de filtros cerrados (Matrix, 2007).....	35
Figura 1.19. Materiales filtrantes empleados en filtros para pretratamiento del influente para la ósmosis inversa (Interlabco LTDA, 2009).....	36
Figura 1.20. Tipos de filtros cartucho (FMP, 2009).....	37

Figura 1.21. Capacidad de separación de partículas y moléculas de procesos de membrana (Rautenbach <i>et al.</i> , 2003).....	44
Figura 2.1. Diagrama de flujo del piloto de desalación de agua de mar compuesto por los pretratamientos convencionales coagulación-floculación-filtración y filtración directa con un sistema de ósmosis inversa.....	56
Figura 2.2. Isométrico del piloto de desalación de agua de mar compuesto por los pretratamientos convencionales coagulación-floculación-filtración y filtración directa con un sistema de ósmosis inversa.....	57
Figura 3.1. Curva de neutralización del agua de mar de período no vacacional (febrero de 2009) para ambos ácidos evaluados.....	68
Figura 3.2. Cloro residual en agua de mar de período no vacacional (febrero 2009) con ajuste de pH a 6.5 para el pretratamiento filtración directa.....	69
Figura 3.3. Comportamiento del color residual en función de la dosis agregada de coagulante en un intervalo de 1-6 mg/L al agua de mar de período no vacacional (febrero de 2009) para el pretratamiento de CCF.....	70
Figura 3.4. Comportamiento de la turbiedad residual en función de la dosis agregada de coagulante en un intervalo de 1-6 mg/L al agua de mar de período no vacacional (febrero de 2009) para el pretratamiento de CCF.....	71
Figura 3.5. Comportamiento de cloro residual después de ajuste de pH (6.5) al agua de mar cruda, precloración y coagulación-floculación al agua de mar de período no vacacional (febrero de 2009) para el pretratamiento CCF.....	72
Figura 3.6. Comportamiento del IDE ₅ de las pruebas de laboratorio realizadas <i>in situ</i> en la época vacacional (abril 2009) para el pretratamiento filtración directa aplicando dos diferentes ácidos (HCl y H ₂ SO ₄).....	73
Figura 3.7. Comportamiento del color residual en función de la dosis agregada de coagulante para pruebas de laboratorio realizadas <i>in situ</i> en época vacacional (abril de 2009) para el pretratamiento CFF.....	74
Figura 3.8. Comportamiento de la turbiedad residual en función de la dosis agregada de coagulante para pruebas de laboratorio realizadas <i>in situ</i> en época vacacional (abril de 2009) para el pretratamiento CFF.....	74
Figura 3.9. Comportamiento del IDE ₅ de las pruebas de laboratorio realizadas <i>in situ</i> en la época vacacional (abril de 2009) para el pretratamiento de CCF.....	75
Figura 3.10. Curva de neutralización del agua producto o permeado para ambas bases evaluadas.....	76
Figura 3.11. Comportamiento del IDE ₁₅ con filtración directa como proceso principal del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	78
Figura 3.12. Comportamiento del caudal con filtración directa como proceso principal del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	78

Figura 3.13. Comportamiento del porcentaje de recuperación con filtración directa como proceso principal el pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	79
Figura 3.14. Comportamiento de la presión en filtro dual y filtros cartucho instalados en las pruebas con filtración directa como proceso principal del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	80
Figura 3.15. Comportamiento del pH con filtración directa como proceso principal del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	81
Figura 3.16. Comportamiento de la turbiedad con filtración directa como proceso principal del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	81
Figura 3.17. Comportamiento del color con filtración directa como proceso principal del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	82
Figura 3.18. Comportamiento de la conductividad eléctrica con filtración directa como proceso principal del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	83
Figura 3.19. Comportamiento del IDE ₁₅ en función de la dosis aplicada de Al ₂ (SO ₄) ₃ al agua de mar pretratada por coagulación-floculación-filtración como procesos principales del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	84
Figura 3.20. Comportamiento del IDE ₁₅ del agua de mar, aplicando la mejor dosis de Al ₂ (SO ₄) ₃ en coagulación-floculación-filtración como procesos principales del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	84
Figura 3.21. Comportamiento del caudal del agua de mar pretratada por coagulación-floculación-filtración como procesos principales del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	85
Figura 3.22. Comportamiento del porcentaje de recuperación por coagulación-floculación-filtración como procesos principales del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	86
Figura 3.23. Comportamiento de la presión en filtro dual y filtros cartucho instalados en las pruebas con coagulación-floculación-filtración como procesos principales del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	86
Figura 3.24. Comportamiento del pH con coagulación-floculación-filtración como procesos principales del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	87
Figura 3.25. Comportamiento de la turbiedad por coagulación-floculación-filtración como procesos principales del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.....	88
Figura 3.26. Comportamiento del color con coagulación-floculación-filtración como proceso principal del pretratamiento de ósmosis inversa.....	89
Figura 3.27. Comportamiento de la conductividad eléctrica con coagulación-floculación-filtración como proceso principal del pretratamiento de ósmosis inversa.....	90

Figura 3.28. Comparación del valor del IDE ₁₅ medido al agua de mar cruda y en el efluente de los dos tipos de pretratamientos preseleccionados aplicados a la planta piloto de desalación por OI.....	91
Figura 3.29. Comparación de los valores de turbiedad del agua en diferentes etapas de la planta piloto de desalación por OI y aplicando los dos tipos de pretratamientos preseleccionados.....	91
Figura 3.30. Comparación de los porcentajes de remoción de turbiedad del agua en diferentes etapas de la planta piloto de desalación por OI y aplicando los dos pretratamientos preseleccionados.....	92
Figura 3.31. Comparación de los valores de color del agua en diferentes etapas de la planta piloto de desalación por OI y aplicando los dos pretratamientos preseleccionados.....	92
Figura 3.32. Comparación de los porcentajes de remoción de color del agua en diferentes etapas de la planta piloto de desalación por OI y aplicando los dos pretratamientos preseleccionados.....	93
Figura 3.33. Comparación del pH del agua en diferentes etapas de la planta piloto de desalación por OI y aplicando los dos pretratamientos preseleccionados.....	93
Figura 3.34. Tiempo de operación máximo de la planta piloto de desalación por OI por vida útil de filtros cartucho aplicando los dos tipos de pretratamientos preseleccionados.....	94
Figura 3.35. Comparación del caudal medido en la planta piloto de desalación por OI aplicando los dos tipos de pretratamientos preseleccionados.....	95
Figura 3.36. Comparación del porcentaje de recuperación en el proceso de OI para los dos tipos de pretratamientos preseleccionados aplicados en planta piloto.....	95
Figura 3.37. Comparación de la conductividad eléctrica del agua de mar cruda, permeado y rechazo de planta piloto de desalación por OI y aplicando los dos tipos de pretratamientos preseleccionados.....	96
Figura J.1. Comportamiento del cloro residual con respecto a la dosis inicial de cloro.....	120
Figura K.1. Comportamiento de la turbiedad con respecto a dosis de coagulante aplicado (0-10 mg/L) al agua de mar (febrero de 2009).....	122
Figura K.2. Comportamiento del color con respecto a dosis de coagulante aplicado (0-10 mg/L) al agua de mar (febrero de 2009).....	122

LISTA DE FOTOS

Foto 2.1. Equipo de OI y filtro a presión.....	58
Foto 2.2. Fabricación de cuerda a tubos de PVC.....	58
Foto 2.3. Instalación hidráulica de bomba de alimentación a filtro a presión.....	59
Foto 2.4. Instalación hidráulica del filtro a presión a filtros cartucho.....	59
Foto 2.5. Instalación hidráulica de filtro cartucho a bomba de alta presión.....	59
Foto 2.6. Instalación hidráulica de bomba de alta presión a membranas de OI.....	60
Foto 2.7. Instalación de sistemas de retrolavado de filtro y lavado de membranas de OI.....	60
Foto 2.8. Instalación hidráulica de la planta piloto de OI.....	60
Foto 2.9. Sistema para determinación de prueba del IDE.....	63
Foto 2.10. Sistema para prueba de jarras a nivel laboratorio.....	65

RESUMEN

El objetivo de este estudio es determinar el mejor pretratamiento (coagulación-floculación-filtración o filtración directa) para el proceso de ósmosis inversa de una planta piloto de desalación de un agua de mar. Este trabajo se compone de cuatro capítulos principalmente y se describen a continuación:

En el Capítulo 1 se presenta el marco teórico, dentro de la información más importante resaltan generalidades de la desalación y, en particular, las del proceso de ósmosis inversa (OI). Para este proceso de desalación se describen estadísticas nacionales e internacionales, principales componentes, los diferentes tipos de membranas por su configuración empleadas en el tratamiento de agua y las principales características de las membranas. Debido a que los trenes de plantas desaladoras con OI dependen fuertemente de la calidad del agua a tratar, se analizan algunos aspectos del agua de mar como salinidad y composición química entre otros parámetros de influencia. Finalmente, se describen los diferentes tipos de pretratamientos, tanto físicos como químicos, aplicados al agua de mar con la finalidad de reducir el potencial de ensuciamiento de membranas de OI del agua de mar para proporcionar constantemente una alimentación de alta calidad.

En el capítulo 2 se describen los materiales, reactivos, sistemas y técnicas experimentales y analíticas de las cinco principales etapas de estudio: 1) muestreo y caracterización de agua de mar, 2) preselección de dos tipos de pretratamiento y el post-tratamiento del proceso de OI para la desalación de agua de mar, 3) realización de pruebas de laboratorio para la determinación de los reactivos y sus dosis a utilizar en las etapas de los dos pretratamientos y el post-tratamiento del proceso de OI en planta piloto, 4) realización de pruebas de pretratamiento en una planta piloto de desalación por OI como proceso principal y 5) determinación del pretratamiento más económico de los dos determinados con base en una estimación de costos de reactivos y materiales.

Dentro de los principales resultados a nivel laboratorio, en el capítulo 3, se tiene que para el pretratamiento integrado por los procesos de coagulación-floculación, el mejor ácido para ajustar pH fue el H_2SO_4 y el mejor coagulante fue el $Al_2(SO_4)_3$ debido a que a menor dosis de coagulante aplicada se tienen los mejores resultados para el pretratamiento de agua de mar. En las pruebas realizadas en planta piloto, el mejor pretratamiento fue coagulación-floculación-filtración ya que se obtuvo un valor de IDE_{15} para agua pretratada (3.37 %/min) por debajo del valor máximo recomendado por fabricantes de membranas (5 %/min) y remociones superiores al 94% para parámetros como color, turbiedad y conductividad eléctrica de agua cruda aplicando dicho pretratamiento y el proceso de OI.

Finalmente, en el capítulo 4, se presentaron las principales conclusiones de este trabajo, de las cuales la más importante es que el mejor pretratamiento para la planta piloto de desalación de un agua de mar por OI fue el basado por coagulación-floculación-filtración como procesos principales.

INTRODUCCIÓN

La preocupación mundial por la escasez del agua potable está aumentando día con día. La explotación de los recursos naturales del agua combinada con una demanda más alta de este recurso ha conducido a la búsqueda creciente de fuentes alternativas de abastecimiento de agua dulce. La desalación de agua de mar proporciona una fuente alternativa para producción de agua para uso industrial, municipal, irrigación e incluso potable (Fritzmann *et al.*, 2007).

La desalación o remoción de sales es un proceso de separación que permite remover los elementos que contiene un agua, sean éstos de naturaleza física o química y que generan dificultades para su utilización para diferentes fines.

Para determinar la situación de la desalación de aguas saladas se debe conocer que el planeta cuenta con aproximadamente 1,386 millones de kilómetros cúbicos de agua, de la cual el 97.5% es agua salada y 2.5% agua dulce; de este último, el 69% del agua se encuentra congelada en los polos y zonas montañosas, el 29.9% se encuentra en acuíferos subterráneos, el 0.9% se encuentra en la atmósfera y el 0.3% se encuentra en ríos, lagos, arroyos, embalses (Fuentes y Ramírez, 2003).

A lo largo de los siglos se han reportado estudios en los que se intentó obtener agua dulce a partir de agua salada, pero es realmente en este siglo cuando esos intentos se plasmaron en tecnologías que adquieren confiabilidad y que garantizan ese proceso de transformación; sin embargo, los avances tecnológicos en la desalación del agua han sido muy lentos y además han resultado muy costosos, siendo inalcanzables durante años para la mayoría de las poblaciones que requieren de ellos. En años más recientes se han superado esos grandes inconvenientes, es decir, hablar hoy día de desalación es algo que se considera normal.

Actualmente, la Ósmosis Inversa (OI) es uno de los métodos más frecuentemente aplicado para la desalación de agua de mar. Debido principalmente al incremento continuo actual en el costo de derivados del petróleo y la escasez de agua potable en el mundo hacen día con día que el proceso de OI sea un proceso más atractivo para generar agua potable; aunado a esto, con el actual problema ambiental denominado calentamiento global se analiza la posibilidad de operar los procesos de OI por medio de energía renovable con la finalidad de hacer aún más viable este proceso.

Sin embargo, una desventaja crucial de la OI es la susceptibilidad de ensuciamiento de la membrana de este proceso debido a la presencia de materia coloidal, particulada, orgánica e inorgánica disuelta en agua de alimentación y crecimiento biológico en el sistema de OI. Consecuentemente, el factor crítico para un buen resultado en desalación de agua de mar por ósmosis inversa es el pretratamiento, el cual puede reducir el potencial de ensuciamiento contenido en el agua de mar y proporcionar alimentación constante de alta calidad a las membranas de OI (Xu *et al.*, 2008).

El descubrimiento de membranas capaces de separar sales ha sido de gran relevancia para la disminución de los costos y la puesta a disposición de una tecnología más accesible como membranas de OI y toda la tecnología desarrollada en torno a ellas. A la fecha, los fabricantes de membranas han puesto mucho énfasis en el Índice de Densidad de Ensuciamiento (IDE) por

sus siglas en inglés (Silt Density Index (SDI)) como parámetro global para determinar la calidad del agua con la finalidad de prevenir el ensuciamiento en membranas de OI (Medina, 2000).

El diseño y la operación de las plantas de desalación de agua de mar por OI dependen fuertemente de la calidad del agua de mar a tratar. El funcionamiento de los sistemas de OI para desalación reside en la alimentación de agua pretratada de alta calidad; el agua que se va a desalar contiene una serie de componentes orgánicos y no orgánicos que deben ser controlados dentro de determinados límites, para que el agua pueda aplicarse directamente a unos elementos tan sensibles como las membranas, sin que se produzca un deterioro importante de las mismas. Por lo que, para este fin se emplean diferentes tipos de pretratamientos tanto físicos como químicos, obteniendo eficiencias de remoción y alta calidad de agua pretratada. Actualmente a nivel mundial, los principales pretratamientos aplicados al agua de mar son los de tipo convencional: filtración directa y coagulación-floculación-filtración sobre arena y filtración dual (arena-antracita) debido a su eficiencia aceptable y bajo costo (Aboabboud *et al.*, 2007; Fritzmann *et al.*, 2007; Khawaji *et al.*, 2007). Para este último tipo de pretratamiento se aplica normalmente cloruro férrico como coagulante, sin embargo, existen en el mercado otros coagulantes, como el sulfato y los policloruros de aluminio (PAX), que podrían ser más eficientes que el cloruro férrico. Sin embargo, no se identificaron reportes relacionados con el estudio de la influencia del tipo y dosis de coagulante sobre la calidad del influente (pretratado) a la OI.

Con base en lo anterior, se plantearon en este estudio los objetivos que se presentan en la siguiente sección.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar el mejor pretratamiento de dos tipos evaluados para el proceso de ósmosis inversa de una planta piloto de desalación de agua de mar.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Preseleccionar dos pretratamientos para agua de mar, eficientes y aplicados a nivel mundial según reportes publicados, que permitan obtener un efluente de calidad adecuada y costo aceptable para ser tratado por el proceso de ósmosis inversa.
2. Determinar reactivos y dosis para las etapas de los pretratamientos preseleccionados, con base en pruebas de tratamiento realizadas en laboratorio.
3. Determinar los mejores reactivos para las etapas del post-tratamiento del efluente de ósmosis inversa de una planta piloto, con base en pruebas de tratamiento realizadas en laboratorio.
4. Diseño e instalación de una planta piloto de desalación de agua de mar por proceso de ósmosis inversa.
5. Determinar el pretratamiento más económico de los dos determinados con base en una estimación de costos de reactivos y materiales.

CAPÍTULO 1. ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

1.1. PROCESO DE DESALACIÓN

1.1.1. Generalidades del proceso de desalación

Se considera como un proceso de separación de las sales de una solución, su extensión a las tecnologías existentes permite distinguir entre procesos que separan el agua de las sales y los que realmente efectúan la separación de sales de la solución (Medina, 2000).

Las tecnologías de la desalación se pueden clasificar por su mecanismo de separación en desalación térmica y desalación basada en membrana. La desalación térmica separa la sal del agua por la evaporación y la condensación, mientras que en la desalación por membrana el agua difunde a través de una membrana mientras que las sales se conservan casi totalmente. Una descripción de las técnicas disponibles de la desalación se presenta en la tabla 1.1.

Tabla 1. 1. Tecnologías aplicadas en desalación (Fritzmann *et al.*, 2007)

Tecnologías térmicas de desalación	Tecnologías de desalación basadas en membrana
Destilación Súbita Multi-Etapa (DSME)	Ósmosis Inversa (OI)
Destilación Multi-Efecto (DME)	Nanofiltración (NF)
Destilación por compresión de vapor (DCV)	Electrodialisis (ED)

Otra forma de clasificar a los procesos de desalación es por la clase de separación sal-agua (separación agua de sales y separación sales del agua) como se presenta en tabla 1.2.

Tabla 1. 2. Clasificación de los procesos de desalación (Porteous, 1975; AWWA, 2004; Fritzmann *et al.*, 2007; US Department of the Interior, 2003)

Clase de separación	Energía utilizada	Proceso	Sistema
Separación agua de sales	Vapor	Evaporación	Destilación solar
			Destilación súbita simple
			Destilación en tubos sumergidos
			Destilación súbita multietapa
			Destilación multiefecto de tubos horizontales
			Destilación multiefecto de tubos verticales
			Compresión mecánica de vapor
			Termocompresión de vapor
Separación sales del agua	Frío	Cristalización	Formación de hidratos
	Presión	Membrana	Congelación
Separación sales del agua	Carga eléctrica	Membrana selectiva	Ósmosis Inversa
	Atracción química	Resina	Electrodialisis
			Intercambio iónico

La ósmosis inversa y la destilación súbita multietapas son las técnicas más usadas, la decisión para seleccionar cierta tecnología de desalación es función de la salinidad del agua de

alimentación, calidad del producto requerida así como por factores específicos del sitio tales como costo de trabajo, área disponible, costo energético y la demanda local de electricidad (Fritzmann *et al.*, 2007).

La figura 1.1 presenta la distribución de los procesos de desalación a nivel mundial, siendo la ósmosis inversa y la destilación súbita multietapas (MSF) los principales procesos de desalación empleados a nivel mundial (Wolff, 2006; Zhou y Tol, 2005).

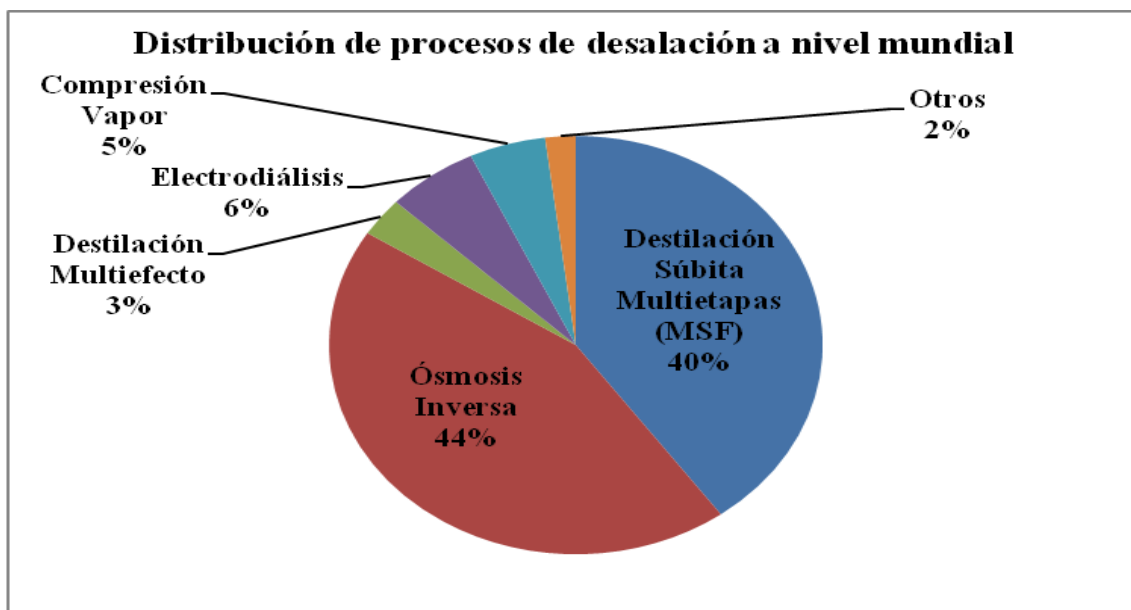


Figura 1. 1. Distribución de los procesos de desalación a nivel mundial (Wolff, 2006; Zhou y Tol, 2005).

La desalación, que al inicio tuvo una aplicación principalmente para usos urbanos y domésticos, posteriormente ha derivado hacia otros como la industria y agricultura; esto se debe fundamentalmente a la entrada de nuevas tecnologías más económicas, sencillas de implementar y de menor consumo energético. La desalación con fines de abastecimiento urbano, especialmente en el caso de agua de mar, sigue siendo la más importante por el tamaño de sus instalaciones y la capacidad total instalada, en los países industrializados las instalaciones de desalación con fines industriales son muy numerosas y por lo tanto más importantes que las de agua urbana.

En términos generales se dice que las instalaciones de desalación para abastecimiento doméstico se encuentran principalmente en los países del Golfo Pérsico (Irán, Irak, Kuwait, Arabia Saudita, Bahrein, Qatar, Emiratos Árabes Unidos, Omán), los países árabes del Mediterráneo (Líbano, Siria, Egipto, Libia, Túnez, Marruecos, Argelia) y la zona sur de Italia y España, sobre todo las Islas Canarias; mientras que las instalaciones industriales se encuentran preferentemente en Estados Unidos, Japón y los países de la Unión Europea (GWI, 2005).

Una gran parte de la capacidad de desalación en el mundo está instalada en el Oriente Medio; La OI está ganando rápidamente campo en el mercado, debido al incremento continuo actual en el costo del petróleo y a la escasez de agua potable hacen al proceso de ósmosis inversa un proceso más atractivo para la producción de agua potable. Los países áridos y semiáridos en Europa también utilizan la desalación como manera de superación de la escasez de agua regional y casi todas las plantas recientemente instaladas de desalación utilizan ósmosis inversa. La figura 1.2 presenta la distribución de la capacidad mundial de desalación agrupada por zonas continentales (GWI, 2005).

Actualmente, más de 15,000 plantas de desalación están operando a nivel mundial, aproximadamente el 50% de estas plantas desaladoras son plantas de ósmosis inversa (Sauvet-Goichon *et al.*, 2007).

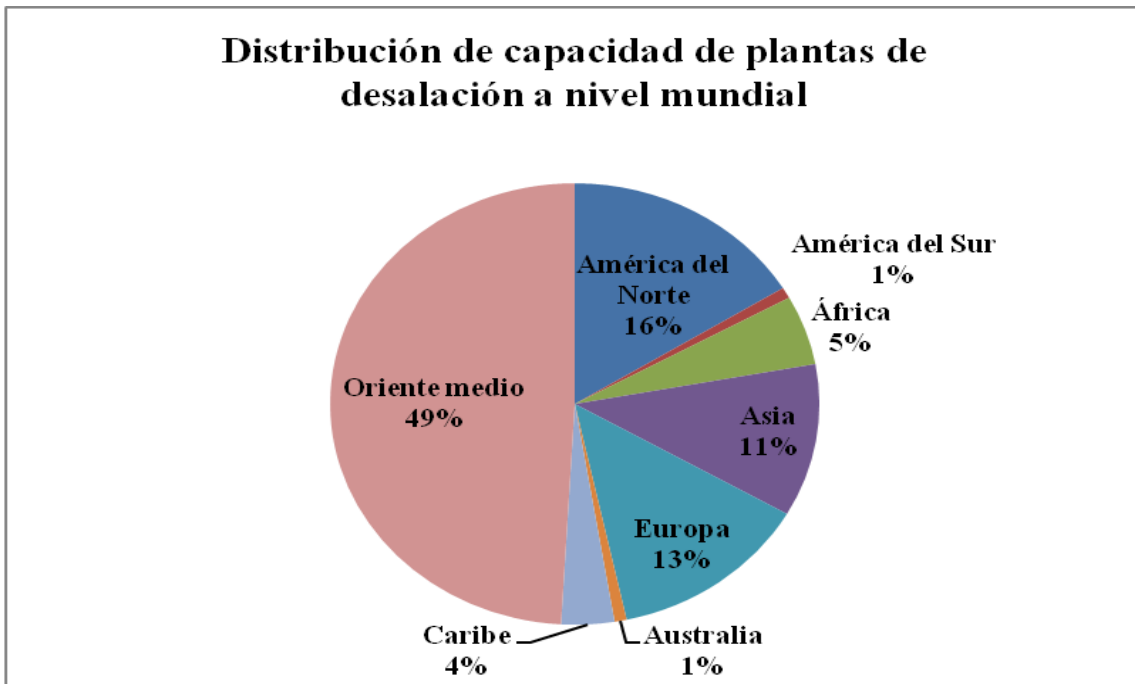


Figura 1. 2. Distribución de la capacidad de plantas de desalación alrededor del mundo (Wangnick, 2002).

1.1.2. Demanda prevista para el proceso de desalación

En Europa, las capacidades de desalación se concentran alrededor del Mar Mediterráneo en España e Italia donde la desalación se utiliza para superar la escasez del agua en regiones con los recursos de agua limitados que sufren por demanda de agua para turismo y agricultura.

La región del Golfo continuará siendo el mercado más grande para la desalación debido a un crecimiento rápido en la población y el reemplazo necesario de plantas de tratamiento, hasta el doble en capacidad se espera en 2015; los países alrededor del Mar Mediterráneo experimentarán la más grande velocidad de crecimiento con una expansión más pequeña esperada en Asia hasta 2015. Asia se convertirá en un mercado cada vez mayor debido a su enorme población y desarrollo económico que conduzcan muy probablemente a una demanda del agua que no se pueda satisfacer con fuentes de agua convencionales. La figura 1.3 muestra un pronóstico de la capacidad de la desalación hasta 2015 en diversas regiones (Fritzmán *et al.*, 2007).

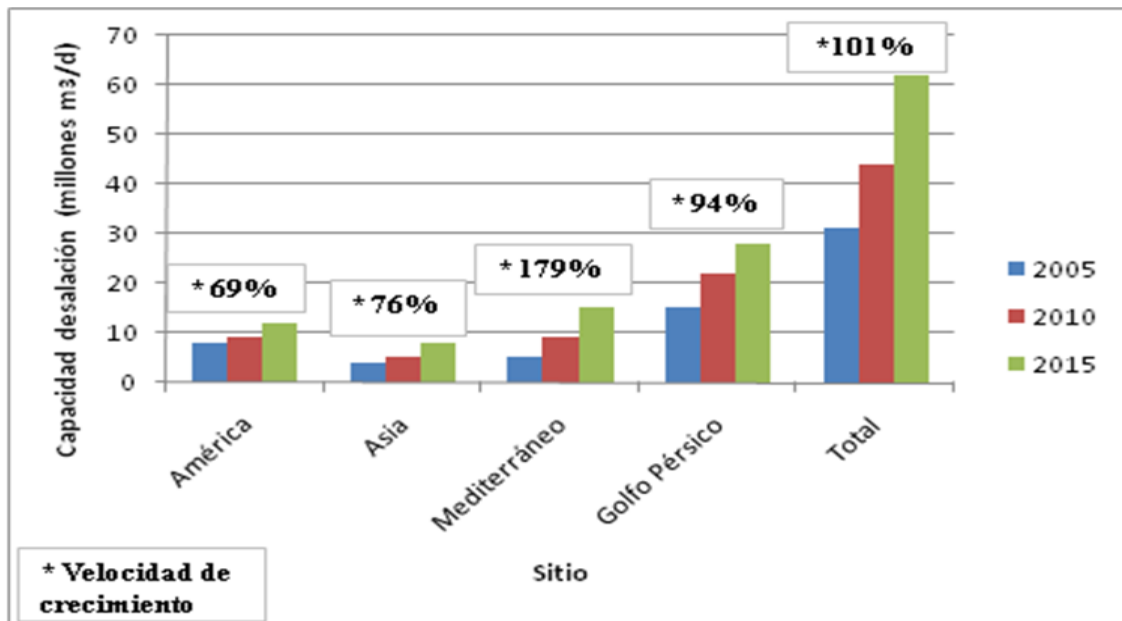


Figura 1. 3. Crecimiento previsto de las capacidades de la desalación alrededor del mundo (Inteligencia Global del Agua, 2005).

1.1.3. Comparación de tecnologías del proceso de desalación

Los procesos de destilación necesitan calor para provocar el cambio de estado líquido a vapor, que es independiente de la salinidad del agua; la OI aplica presión para vencer la presión osmótica del agua a tratar, por lo que, cuanto mayor sea la salinidad del agua mayor será la presión osmótica a vencer; por otro lado, el desplazamiento de los iones que componen el agua mediante la aplicación de una carga eléctrica, en el proceso de electrodiálisis, exigirá una intensidad de corriente mayor a medida que aumenta el número de iones o concentración de la solución.

Por lo mencionado anteriormente, se entiende que la destilación se emplea únicamente a nivel comercial para desalar agua de mar, la electrodiálisis para desalar agua salobre y la OI para agua salobre como agua de mar (Medina, 2000).

Los procesos de destilación requieren un cambio de estado en el cual existe una pérdida importante de energía; por ello, siendo éstos los más antiguos han ido perdiendo importancia en los últimos años a favor de los procesos de membrana, más eficientes energéticamente. Además del aspecto energético, existen otros aspectos de estas tecnologías que deben ser conocidas, pues en situaciones concretas puede resultar ventajosa la elección de una frente a las otras; la tabla 1.3 presenta como simple referencia una comparación de las características de los procesos antes mencionados.

Tabla 1. 3. Comparación de características de tres tecnologías de desalación (Medina, 2000)

TECNOLOGÍA		
DESTILACIÓN	ÓSMOSIS INVERSA	ELECTRODIÁLISIS
<ul style="list-style-type: none"> ➤ No depende de la salinidad del agua. ➤ Produce un agua de calidad casi pura. ➤ Puede acoplarse a una central eléctrica productora de energía. ➤ Necesita una fuente de vapor que según los casos puede o no ser independiente del proceso. ➤ Tiene un elevado consumo energético. ➤ Requiere una elevada inversión inicial. ➤ Precisa de una extensión de terreno importante. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tiene el menor consumo energético. ➤ Se puede utilizar tanto en agua salobre como de mar. ➤ La inversión precisa está ligada a las características del agua a tratar y en general es inferior a la de los otros sistemas. ➤ Además de iones separa bacterias y virus por lo que también tiene aplicación como sistema de desinfección. ➤ Precisa una extensión de terreno de tipo medio. ➤ Precisa pretratamientos físico-químicos que a veces pueden ser importantes. ➤ Necesita una fuente exterior de energía. ➤ La presencia de iones específicos limita sus posibilidades de aplicación eficiente. ➤ Su manejo se complica en función de las características físico-químicas del agua. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Su manejo es sencillo en todos los casos. ➤ Su consumo de reactivos es menor que en los otros sistemas. ➤ Tiene un consumo energético de tipo medio que para aguas de salinidades bajas puede ser similar a la de OI. ➤ Necesita menores tratamientos químicos que los otros sistemas. ➤ Sus necesidades de espacio e inversión son intermedias entre las de los otros sistemas. ➤ Su costo de instalación es superior al de la OI. ➤ El agua producto es de inferior calidad a la de las otras tecnologías.

1.1.4. Otras aplicaciones del proceso de desalación

El principal objetivo de la desalación es la remoción de sales para adecuarla a las necesidades de la población o agrícolas; cabe señalar, que no es la única aplicación y de hecho la extensión de estas tecnologías a campos cada vez más amplios tiene más relación con las aplicaciones industriales que con los usos doméstico o agrícola.

Existen en el sector industrial demasiadas industrias que requieren un agua de elevada calidad para sus procesos como la industria alimentaria o la electrónica y existen otras en que el agua es utilizada como refrigerante y en este proceso se evapora, por lo que requiere agua de calidad específica para evitar incrustaciones en tuberías, calderas u otros equipos reduciendo así la eficiencia del proceso. Es por ello, que esos requisitos especiales exigen una remoción más selectiva de iones.

Los procesos de desalación mediante membranas están siendo cada vez más aplicados para actividades específicas como el decapado de pinturas, remoción de los taninos de los curtidos y cualquier otro tipo de vertidos industriales contaminantes, los procesos de ablandamiento de aguas, reutilización de aguas residuales de las estaciones depuradoras, entre otras.

La utilización de membranas de OI, nanofiltración y electrodiálisis, según los casos, precedidas de un pretratamiento bastante sofisticado para eliminación de sólidos en suspensión, es también una alternativa cada vez más en uso (Medina, 2000).

1.1.5. Situación actual del proceso de desalación en México

En México existen 320 sitios donde se encuentran instaladas 435 plantas desaladoras, esta infraestructura se encuentra distribuida en todo el país (Fuentes, 2007); los estados con mayor número de plantas desaladoras son Quintana Roo, Baja California Sur, Coahuila, Durango y Baja California Norte. En la actualidad sólo se encuentra operando el 64.8% de las plantas desaladoras en México (tabla 1.4).

Tabla 1. 4. Presenta la situación actual de la desalación en México (IDA, 2006)

Estado	Sitios donde existen plantas desaladoras	Número de unidades	% Nacional	Operan		Capacidad máxima instalada (m ³ /d)
				Si	No	
Baja California Norte	23	38	8.74	24	14	51,938
Baja California Sur	71	73	16.78	53	20	36,971
Campeche	8	19	4.37	14	5	5,456
Coahuila	31	33	7.59	23	10	7,668
Colima	17	18	4.14	2	*	2,856
Distrito Federal	14	17	3.91	12	5	95,471
Durango	26	26	5.98	13	13	868
Edo. México	3	4	0.92	2	2	7,000
Guerrero	6	6	1.38	3	3	2,355
Jalisco	3	4	0.92	3	1	2,865
Morelos	2	21	4.83	21	---	110
Nuevo León	5	5	1.15	5	---	2,847
Oaxaca	1	4	0.92	4	---	14,256
Quintana Roo	79	124	28.51	73	51	53,339
San Luis Potosí	1	1	0.23	1	---	60
Sonora	16	22	5.06	15	7	9,349
Tamaulipas	4	4	0.92	2	2	5,100
Veracruz	9	15	3.45	11	4	12,167
Yucatán	1	1	0.23	1	---	700
Total Nacional	320	435	100	282	137	311,376

(*) Desconocido

La figura 1.4 presenta la distribución del proceso de desalación en México, obteniendo que el proceso de desalación por ósmosis inversa es ampliamente dominante en el país.

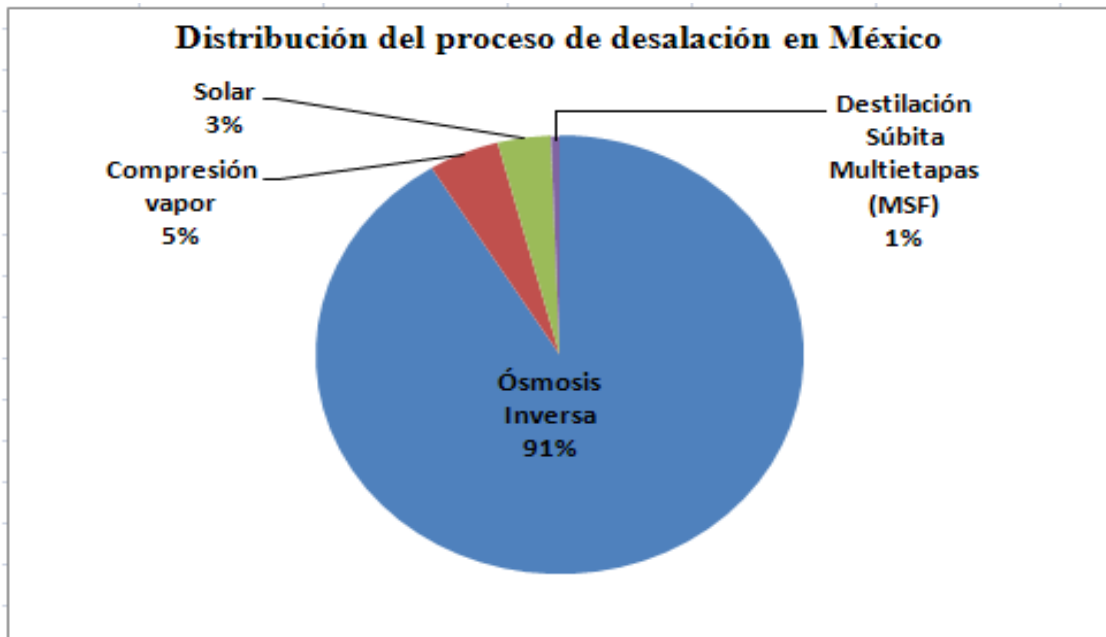


Figura 1. 4. Distribución del proceso de desalación en México (Fuentes y Ramírez, 2003).

La figura 1.5 presenta los diferentes usos empleados para las plantas desaladoras instaladas en México (435 plantas desaladoras), obteniendo que las plantas desaladoras son principalmente para uso turístico seguido del uso municipal.



Figura 1. 5. Usos para plantas desaladoras en México (Fuentes y Ramírez, 2003).

1.2. PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA

1.2.1. Generalidades del proceso de ósmosis inversa

El proceso de ósmosis es la base de la tecnología de ósmosis inversa, y es un fenómeno natural que se produce en las células de los seres vivos, en la cual dos soluciones de diferente concentración salina se ponen en contacto a través de una membrana semipermeable y tienden a igualar sus concentraciones; debido a lo anterior, se produce un movimiento desde la solución más diluida hacia la más concentrada, que se detiene cuando se alcanza un equilibrio entre ambas concentraciones. La fuerza que provoca ese movimiento se denomina presión osmótica y está relacionada con la concentración de sales de ambas soluciones, como se muestra en la figura 1.6.

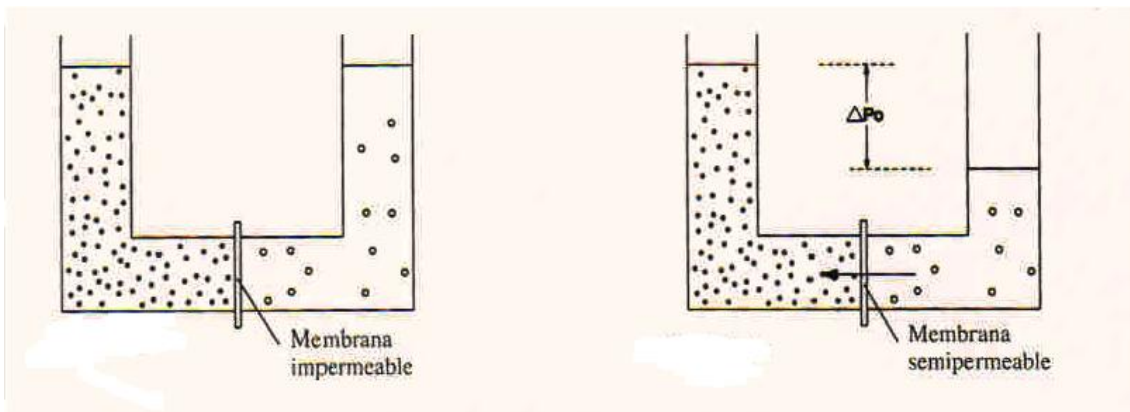


Figura 1. 6. Principios del proceso de ósmosis (Medina, 2000).

Si se invierte el proceso aplicando una presión en el tubo de la solución más concentrada (figura 1.7), el movimiento se produce desde ésta hacia la más diluida. Finalmente, se alcanza un equilibrio, la altura que alcanza la solución en el nuevo equilibrio se encuentra en función de la presión aplicada, de las características de la membrana y de las concentraciones de ambas soluciones. Este proceso es lo que constituye la ósmosis inversa.

Se le denomina ósmosis inversa porque para conseguir un flujo de solvente a través de la membrana hay que ejercer al menos una presión suficiente para vencer la presión osmótica de la solución.

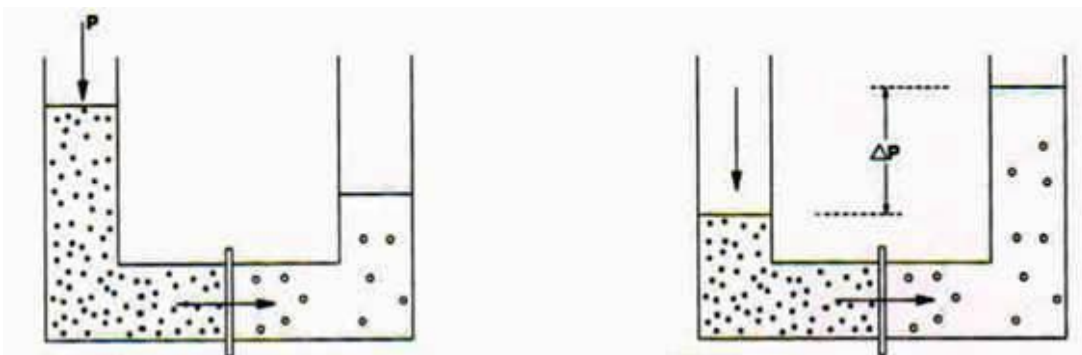


Figura 1. 7. Principios del proceso de ósmosis inversa (Medina, 2000).

Los principales componentes de un sistema de ósmosis inversa son:

- ✓ Bomba de alta presión: equipo que proporciona una presión mayor a la presión osmótica al agua para ser tratada en las membranas de ósmosis inversa.
- ✓ Membrana: lámina semipermeable empleada para el tratamiento de agua.
- ✓ Estructura mecánica: empleada para soportar los esfuerzos a los cuales se somete la membrana para el proceso de separación.
- ✓ Contenedor: empleado para colocar la membrana para su operación en el tratamiento de agua.

1.2.2. Clasificación de membranas para el proceso de ósmosis inversa

Las membranas se clasifican principalmente por su naturaleza química en:

- Orgánicas
 - *Poliamida aromática*
 - *Acetato de celulosa*
 - *TFC (poliamida compuesta)*
 - *Polisulfona*
 - *Polioléfina aromática*
- Inorgánicas
 - *Cerámicas (óxidos, nitruros, carburos de metales como aluminio, zirconio o titanio).*

Actualmente, las membranas más aplicadas son las orgánicas de poliamida aromática y acetato de celulosa debido a que presentan mejores resultados en el tratamiento de agua de mar.

El elemento diferenciador de la ósmosis inversa en comparación a otros procesos es la membrana, la cual debe reunir las siguientes características (Lonsdale *et al.*, 1972; Lenntech, 2008):

- ✓ Debe ser capaz de resistir las presiones (aprox. 50-90 atm) a que se va a someter la solución para invertir el proceso
- ✓ Suficientemente permeable al agua para que el flujo que proporciona sea elevado
- ✓ Rechazar un porcentaje de sales elevado para que el producto sea de buena calidad.

1.2.3. Configuraciones de membranas para el proceso de ósmosis inversa

La membrana que realiza la separación es una lámina delgada que por sí sola no soportaría los esfuerzos a la cual hay que someterla en el proceso de separación; además, por su reducido caudal unitario, precisaría enormes desarrollos tecnológicos para poder tratar volúmenes importantes.

Por lo anterior, necesita ser integrada a una estructura mecánica que le permita soportar los esfuerzos aplicados como la ocupación del menor espacio posible. Las membranas de ósmosis inversa que se han desarrollado a lo largo del tiempo se han estructurado con base en su configuración en cuatro tipos: tipo plano, tubulares, fibra hueca y enrollamiento en espiral.

1.2.3.1. Membranas de tipo plano

Es el tipo más sencillo y el que inicialmente se aplicó; está constituida por una lámina que se coloca dentro de un marco, rectangular o circular, que actúa de soporte y le confiere rigidez y resistencia. La superficie de estas membranas es pequeña, por lo que para aumentar la producción, se colocan unas encima de otras en el equipo que las contiene, constituyendo una especie de columnas de membranas; también llamadas membranas almohadiformes (Lonsdale *et al.*, 1972; Lenntech, 2008).

La película empleada como membrana no difiere de las que se emplean en otro tipo de configuraciones, por lo que sus características unitarias de caudal y rechazo son similares a las otras.

Su pequeña capacidad productiva es su principal inconveniente; por lo que, al emplearlas en instalaciones de tamaño medio se requieren numerosas membranas colocadas en columnas y resultan voluminosas, incómodas y pesadas para operar aunado al enorme aumento de su costo. Ello provocó el que no tuvieron demasiado éxito en el tratamiento de agua potable por los elevados volúmenes a tratar y que se apliquen en el sector industrial, especialmente el alimentario, para instalaciones de caudal pequeño.

La principal ventaja de estas membranas es que la separación entre membranas (1 a 3 mm), es amplia, por lo que se obstruyen menos que otras y en caso de ensuciamiento se limpian fácilmente con aire y agua. En el sector del agua su mayor aplicación es en aguas muy contaminadas, residuales o con elevada carga orgánica (Medina, 2000). La figura 1.8 presenta los tipos de membranas de tipo plano que son circular y rectangular.

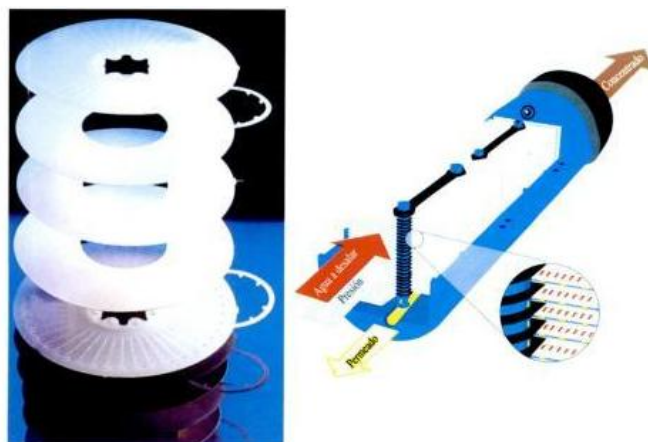


Figura 1. 8. Membranas de tipo plano (Medina, 2000).

1.2.3.2. Membranas tubulares

La membrana, generalmente de diámetro de 0.2-0.6", se encuentra alojada en el interior de un tubo de PVC, que soporta la presión del proceso. En algunos casos se colocan varias membranas

en el interior del tubo de 1.5 a 2" de diámetro; el tubo contiene orificios necesarios para entrada y salida de flujos que intervienen en el proceso (Lenntech, 2008).

Representan una alternativa a las membranas de tipo plano, buscando conseguir una mayor superficie unitaria, pero sin renunciar a las ventajas de dificultad de ensuciamiento y fácil limpieza. Aunque algo más compactas que las membranas de tipo plano, siguen siendo voluminosas en relación con su capacidad productiva (Lonsdale *et al.*, 1972; Medina, 2000).

Su facilidad de fabricación permitió durante cierto tiempo su aplicación en pequeñas instalaciones industriales para tratamiento de agua. En la actualidad sus aplicaciones se limitan al campo industrial. La figura 1.9 presenta el diseño y operación de las membranas tubulares.



Figura 1. 9. Membranas tubulares (Medina, 2000).

1.2.3.3. Membranas de fibra hueca

Estas membranas están estructuradas por un haz de millones de tubos capilares del tamaño de un cabello humano, con huecos. El agua a presión se aplica a la membrana desde el exterior del capilar y la pared de la fibra actúa como lámina o membrana separadora reteniendo las sales, mientras que por el interior del capilar circula el agua producto que ha atravesado la membrana. La salmuera se remueve de manera radial mediante un colector para su evacuación. La superficie de estas membranas es muy grande debido a que está conformada por millones de tubos capilares (Kelle, 1976; Medina, 2000).

Las membranas de fibras huecas tienen un diámetro inferior a 1 μm . En consecuencia, las posibilidades de obstrucción son muy elevadas; las membranas sólo pueden ser usadas para el tratamiento de agua con un bajo contenido de sólidos suspendidos, estas membranas casi siempre son usadas solamente para nanofiltración y ósmosis inversa (Lenntech, 2008).

Su caudal unitario es muy pequeño, pero considerando el haz de fibras que constituyen la membrana, se tiene un caudal importante por membrana (para una membrana de 8" el caudal está entre 388-555 $\text{m}^3/\text{día}$). El espesor de la pared de la fibra es muy grande en relación con su diámetro, lo que permite soportar las altas presiones utilizadas. La figura 1.10 presenta los tipos de membranas de fibra hueca (Medina, 2000).



Figura 1. 10. Membranas de fibra hueca (emalsa, 2007).

1.2.3.4. Membranas de enrollamiento en espiral

Membranas conformadas por varias láminas rectangulares, que constituyen las membranas propiamente dichas, enrolladas alrededor de un eje cilíndrico provisto de perforaciones que permiten coleccionar el agua producto.

Para el enrollamiento de las láminas desaladoras se disponen éstas, alternadas con un separador impermeable y una malla, de forma en que una membrana enrollada en espiral existen tantas láminas como separadores y mallas.

La malla plástica determina los canales hidráulicos por los que circula el agua a tratar y por su forma cuadrículada garantiza un régimen de funcionamiento turbulento lo que reduce las posibilidades de obstrucción por elementos extraños.

El separador impermeable permite separar el caudal que atraviesa cada una de las láminas o membranas y separarlo de la salmuera.

El conjunto de membranas, mallas y separadores se sella mediante un pegamento por tres de los lados, mientras que por el cuarto lado que constituye la única salida posible para el agua que ha atravesado las membranas, se une al eje perforado.

Finalmente se cierra el conjunto con una envuelta exterior de poliéster con fibra de vidrio, que permite lograr una gran estanqueidad. El enrollamiento permite introducir una gran superficie de membrana en un espacio reducido.

Con estos dos últimos tipos de configuraciones se ha conseguido reducir considerablemente el espacio ocupado por las membranas, aumentando la capacidad del módulo y disminuyendo su precio.

En lo que refiere a tratamientos de desalación de agua, tanto salobre como de mar, para abastecimientos doméstico y agrícola, sólo se emplean estos dos últimos tipos; por lo que, al mencionar a membranas, se tratará de fibra hueca o enrollamiento en espiral. La figura 1.11 presenta la composición y operación de las membranas de enrollamiento en espiral (Medina, 2000).

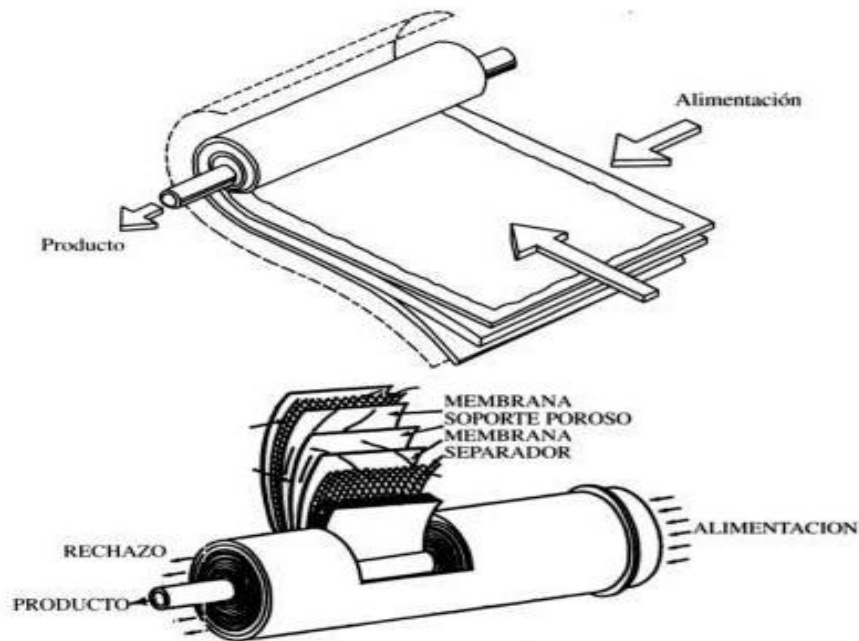


Figura 1. 11. Membrana de enrollamiento en espiral (Medina, 2000).

1.2.4. Características de las membranas para proceso de ósmosis inversa

Las principales características de las membranas se describen a continuación:

1.2.4.1. Rechazo de contaminantes

➤ Rechazo de sales

La aplicación de las membranas de ósmosis inversa es principalmente para la separación de iones de las soluciones acuosas; por ello, la característica más importante de la membrana es su capacidad para rechazar iones. Esta capacidad de separación no es igual en todas las membranas, siendo ésta la principal característica de diferencia entre unas y otras.

En general las membranas retienen mejor los iones polivalentes que los monovalentes. La tabla 1.5 presenta el rechazo promedio (%) de una serie de membranas, en donde no sólo vemos el rechazo de sales total sino el de iones específicos lo que puede diferenciar a una membrana (Medina, 2000).

Tabla 1. 5. Porcentaje promedio de rechazo de iones según el tipo de membranas (Medina, 2000)

Iones	Membrana de poliamida aromática para agua salobre	Membrana de poliamida aromática para agua de mar	Membrana de poliamida aromática para nanofiltración
	promedio de rechazo (%)		
SDT	90-99	99.2-99.6	65-80
Na ⁺	92-98	99.2-99.6	40-60
K ⁺	92-96	99.3-99.6	60-75
Ca ⁺⁺	93-98	99.4-99.8	85-92
Mg ⁺⁺	93-98	99.3-99.8	75-85
Cl ⁻	92-95	99.2-99.5	50-70
SO ₄ ⁼	96-98	99.4-99.7	80-94
CO ₃ H ⁻	93-97	99.3-99.6	75-90
PO ₄ ³⁻	95-98	99.4-99.7	85-95
NO ₃ ⁻	90-95	99.3-99.5	85-90
SiO ₂	80-90	99-99.2	85-92
F ⁻	92-95	99-99.2	60-70

SDT: Sólidos Disueltos Totales

➤ Rechazo de microorganismos

La separación de las bacterias, virus y patógenos en general es prácticamente total ya que el tamaño de los poros de las membranas de OI es de 0.0001-0.004 μm. Además, estos microorganismos se aglutinan unos con otros, formando una masa más grande que es rechazada por las membranas.

Por lo anterior, la utilización de membranas como método de desinfección es bastante eficaz y se presenta como el método más seguro para realizar una esterilización efectiva, pero deben controlarse los rechazos que son altamente contaminantes.

Pero los virus, bacterias y otros microorganismos que llegan a las membranas, se depositan sobre ellas y pueden proliferar, puesto que la propia membrana constituye un medio idóneo para su crecimiento. Por lo que, la desinfección de éstas se hace indispensable siendo preferible aplicar un tratamiento al agua que se va a tratar (Medina, 2000).

➤ Rechazo de compuestos orgánicos

Las moléculas orgánicas con mayor peso molecular (100-1,000) son retenidas de mejor manera que las de peso molecular bajo (0-100), pero el grado de retención está influenciado por el tamaño de la molécula, la estructura dimensional y el tipo de membrana empleada.

En general, los compuestos orgánicos solubles de bajo peso molecular como los ácidos orgánicos y las aminas, pasan a través de las membranas en mayor proporción que los iones.

Otras sustancias complejas, como las que originan el color de las aguas, son eliminadas en su totalidad. Las ligninas y los ácidos húmicos y fúlvicos de igual manera son eliminados.

El rechazo de compuestos orgánicos solubles depende además del material constituyente de la membrana siendo más eficientes las membranas de poliamida que las de acetato de celulosa como se observa en la tabla 1.6.

Tabla 1. 6. Rechazos promedios de compuestos orgánicos por membranas de poliamida y acetato de celulosa (Medina, 2000)

Solución orgánica	Poliamida	Acetato celulosa
	Rechazo en %	
Metanol	41	6
Etanol	86	12
Propanol	94	25
Fenol	87	2
Clorofenol	83	21
Formaldehído	70	20
Acetaldehído	80	59
Acetona	96	22
Ciclohexano	98	37
Ácido acético	70	24
Ácido láctico	89	13
Ácido benzoico	82	18
Etilamina	92	11
Anilina	96	5
Urea	80	9

1.2.4.2. Resistencia al cloro

El cloro es un fuerte oxidante utilizado por sus efectos desinfectantes en los tratamientos de agua, es aplicado en forma de hipoclorito (sódico o potásico) y en forma de cloro gas. La tolerancia de las membranas de desalación al cloro libre disuelto en el agua a tratar es muy diferente según el tipo de membranas.

Las membranas de acetato de celulosa admiten dosis de cloro moderadas durante períodos largos de tiempo, pero a medida que aumenta la dosis, la resistencia de la membrana es menor.

Con base en especificaciones de fabricantes, las membranas de acetato de celulosa soportan dosis de cloro en continuo de hasta 1 mg/L; pueden soportar dosis incluso superiores durante periodos breves de tiempo. Por ello, tienen la posibilidad de ser sometidas a desinfección en el caso de aguas contaminadas.

Por el contrario, las membranas de poliamida no son de carácter general resistentes al cloro. A pesar de ello, algunos fabricantes establecen que las membranas de poliamida, soportan dosis de cloro de 1 mg/L/h.

1.2.4.3. Condiciones hidráulicas

Los permeadores o membranas funcionan en condiciones óptimas cuando las velocidades de circulación del agua cumplen unas determinadas condiciones.

Para conseguir un arrastre adecuado de las sales que se van depositando sobre las membranas, es conveniente que el flujo de salmuera sea constante y uniforme, y que el caudal de alimentación se mantenga también dentro de unos valores, lo que implica fijar unos flujos mínimos de ésta evitando así daños a las membranas.

Las condiciones que se establecen para que las membranas de enrollamiento en espiral obtengan una buena circulación hidráulica a través de la membrana son:

- Mantener un caudal de barrido de salmuera mayor a 10 L/min en membranas de 4” y mayor de 40 L/min para membranas de 8”
- Mantener una relación entre el caudal de la salmuera y el del producto superior a 5
- Mantener un caudal de alimentación a las membranas que debe ser menor de 50 L/min para membranas de 4” y menor de 200 L/min para membranas de 8”.

Paralelamente, el flujo a través de la membrana se rige por una combinación de cuatro factores:

- Presión osmótica
- Permeabilidad de la membrana
- Espesor de la membrana
- La difusión o diferencia de concentraciones.

El flujo a través de una membrana se mide en función del volumen que la atraviesa (transmitido) por unidad de área de membrana en un período y presión determinados. Las unidades pueden ser galón por pie cuadrado y día o litro por metro cuadrado y hora.

1.2.4.4. Carga electroforética

La superficie de todas las membranas tiene una carga eléctrica o electroforética que es consecuencia de los elementos químicos que intervienen en su fabricación. Estas cargas retienen la materia orgánica y los coloides del agua, así como los radicales de los productos químicos del pretratamiento favoreciendo el tratamiento del agua. Las membranas de acetato de celulosa tienen menor carga superficial, pero también menor retención.

Es importante el conocimiento de la carga eléctrica superficial de las membranas para efectos de su utilización en aguas que pueden presentar problemas y para elegir tanto el pretratamiento químico más adecuado como los productos de limpieza convenientes.

1.2.4.5. Concentración de polarización

Durante la operación de la ósmosis inversa, la concentración de polarización ocurre en la superficie de la membrana debido a la acumulación de los iones disueltos del agua de alimentación; la concentración de polarización es el cociente de la concentración de sales en la superficie de la membrana y la concentración de sales en la solución (Kim y Hoek, 2005).

Sobre la membrana se desarrolla una capa límite de disolución no agitada, estancada, de la que se extrae constantemente agua y en las que las sales rechazadas se van acumulando en concentraciones altas, este efecto se conoce como concentración de polarización.

Las sales disueltas en el agua de alimentación son transportadas convectivamente hacia la membrana; como su difusión a través de la misma no se realiza en la misma proporción, se produce una acumulación en la superficie de la membrana. Por tanto, su eliminación sólo puede realizarse por difusión mediante un proceso de transferencia de masa y por una variedad de movimientos hidrodinámicos.

La concentración de polarización está influenciada por:

- La competencia entre el movimiento de convección de las sales hacia la membrana y su difusión fuera de la misma
- El rechazo de las sales
- La presencia o ausencia de flujo transversal en la superficie de la membrana
- Las interacciones entre los distintos componentes del agua de alimentación.

Este fenómeno tiene una serie de efectos negativos:

- El aumento de sales en la interfase aumenta la presión osmótica en la misma; por ello, disminuye la presión efectiva que impulsa el agua a través de la membrana
- Las membranas siempre dejan pasar algunas de las sales presentes en el agua de alimentación, la concentración de las sales en el producto aumenta
- Se pueden producir precipitaciones de los componentes disueltos
- El flujo de agua es reducido debido a una alta presión osmótica asociada con una alta concentración de sales en la alimentación (Fritzmán *et al.*, 2007).

1.2.5. Instalación de membranas para proceso de ósmosis inversa

Las membranas tienen una superficie limitada y también una producción determinada, aunado a que el porcentaje de recuperación por elemento es relativamente pequeño (10-50%); con la finalidad de aprovechar mejor el caudal de salmuera, las membranas se colocan en serie para que el rechazo de una membrana sea utilizado como alimentación para la siguiente membrana (Pique, 1989).

Para obtener la producción deseada de permeado se deben colocar los distintos módulos en paralelo; por ello, surgen los distintos tipos de estructuras de producción en que se colocan las membranas. Para esto, es necesario conocer previamente algunos conceptos importantes:

➤ Etapa

Se define como cada una de las unidades de producción que son alimentadas desde una fuente única (bomba de presión); es decir, un conjunto de tubos de presión o de membranas de fibra hueca colocadas en paralelo y alimentadas por una bomba constituye una etapa.

Para aumentar la eficiencia del proceso, el rechazo de los tubos de presión que sale a una determinada presión, se introduce en otro tubo de presión o membrana, estos tubos constituyen otra etapa. Fácilmente, es posible comprender que al aumentar el número de etapas de una instalación, se eleva el caudal recuperado como producto.

Considerando que al pasar el agua de alimentación de una membrana a otra se va incrementando su salinidad y el rechazo de sales de la membrana no varía; entonces, aumenta el flujo de sales y por tanto empeora su calidad. Es decir, que al aumentar el número de etapas empeora la calidad del agua producto.

➤ Paso

Se le denomina al conjunto de tubos de presión o membranas que siendo alimentadas con los caudales de agua que salen de las membranas de la primera etapa precisan de otra fuente de energía (bomba de presión) para recuperar un nuevo caudal. A partir de esto, tenemos las siguientes estructuras de producción:

- Simple

Se le denomina al conjunto de membranas o tubos de presión colocados en paralelo y que son alimentadas por una bomba. Como se mencionó anteriormente, este tipo de estructura es demasiado ineficiente; por lo que, se usa sólo en instalaciones piloto o experimentales, o en la industria para la extracción de jugos u otros líquidos o sólidos de gran valor. También las instalaciones de agua de mar admiten este tipo de estructuras por su baja recuperación. La figura 1.12 presenta la instalación de simple etapa.

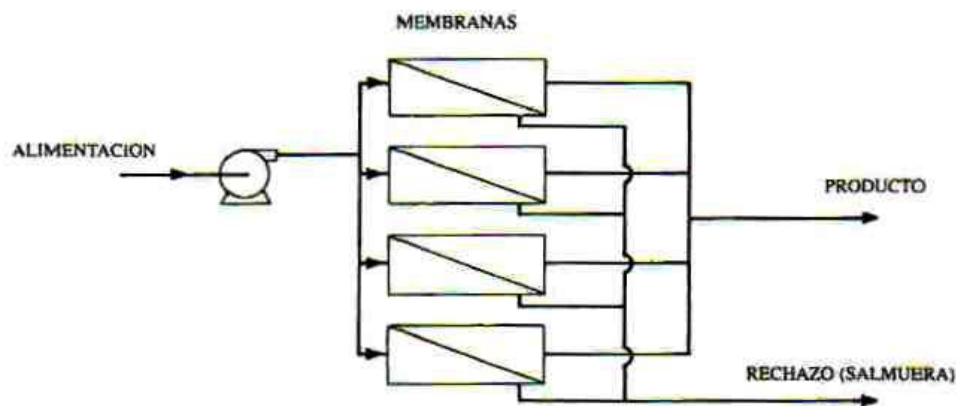


Figura 1. 12. Instalación de simple etapa (Medina, 2000).

- Etapas de salmuera

Consiste en una serie de tubos colocados en paralelo y otros en serie, de forma que el caudal de rechazo (salmuera) de los primeros tubos es utilizado como alimentación de los segundos; es la estructura más frecuente de producción. Dado que en cada etapa se recupera una parte de producto, el caudal de rechazo que llega a la segunda etapa es menor que el inicial y así sucesivamente, por lo que el número de tubos en cada etapa disminuye. En la figura 1.13 presenta una instalación de dos etapas.

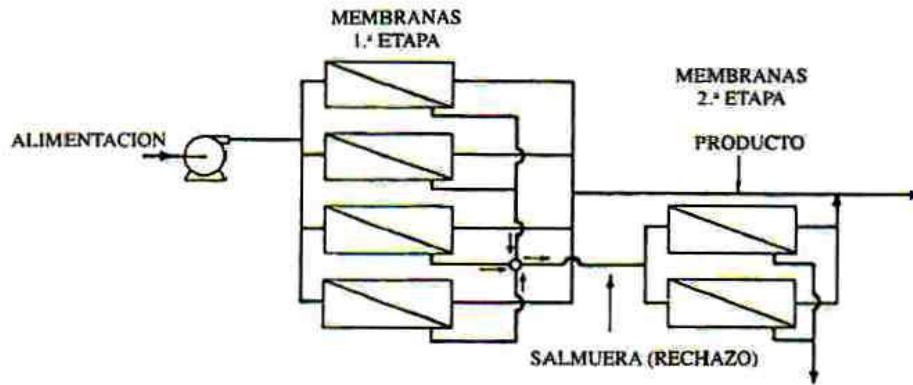


Figura 1. 13. Instalación de etapas de salmuera (Medina, 2000).

Con base en las características de recuperación de la membrana, el porcentaje de recuperación máximo por tubo de seis elementos es de 50%; por lo que, el máximo de etapas suelen ser tres. Mediante la primera etapa se recuperaría el 50%, con la segunda el 25% (50% del caudal de rechazo de la primera) y aplicando la tercera un 12.5% (mitad del caudal de rechazo de la segunda). En total se obtendría un 87.5%; recuperaciones superiores son difíciles y no justificarían una cuarta etapa, por lo que, es preferible recuperar un poco más del límite de 50% en cada una de las etapas.

El diseño de una instalación de dos o tres etapas no depende sólo del gusto del proyectista y de la necesidad de recuperar un gran porcentaje de agua tratada, sino de la composición química del agua. Como consecuencia de que se recupera un porcentaje mayor, la salmuera va incrementando su concentración; Por lo que, las solubilidades de los iones presentes son los que determinarán la capacidad de recuperación de la instalación y por consiguiente el número de etapas.

- Etapas de producto

Se emplea este tipo de instalación cuando se requiere mejorar la calidad del agua producto y para ello se pasa nuevamente por otro conjunto de membranas empleando una bomba independiente.

Su utilización es cada vez menor, la posterior aparición de membranas de agua de mar con rechazos superiores a 99.3% que permiten obtener agua potable en un solo paso. La figura 1.14 presenta la instalación de etapas de producto.

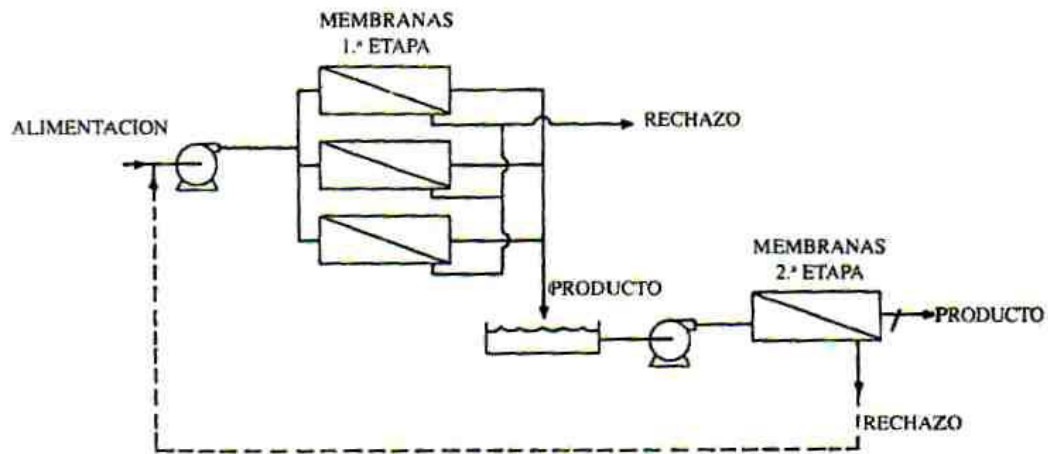


Figura 1. 14. Instalación de etapas de producto (Medina, 2000).

1.3. Parámetros de influencia del proceso de ósmosis inversa

Los parámetros de influencia del proceso de ósmosis inversa se dividen principalmente en cuatro grupos que son:

- ❖ Presión
- ❖ Temperatura
- ❖ Membrana de desalación
- ❖ Calidad del agua a tratar.

A continuación se describen los cuatro principales grupos:

1.3.1. Presión

La membrana funciona a una presión tal que debe ser la necesaria para vencer la presión osmótica diferencial entre las soluciones existentes a un lado y otro de la membrana, y proporcionar un caudal suficiente.

Dependiendo del tipo de módulo existe una presión máxima de operación que no puede excederse, produciéndose un descenso de la permeabilidad de la membrana por compactación, o incluso su rotura o destrucción.

Normalmente, la productividad es siempre mayor operando a alta presión que a baja presión, pero al paso del tiempo el aumento de la presión de operación produce una compactación de la membrana que a su vez reduce el caudal. En ocasiones el descenso alcanza hasta el 25%.

La presión también influye sobre la conductividad del agua producto, al aumentar el flujo a través de la membrana disminuye la conductividad. Además, el paso de agua por las membranas produce una caída de presión que reduce la presión neta que se aplica a cada membrana.

Si la presión se reduce, el paso de agua a través de la membrana es menor, mientras el paso de sales permanece constante; por lo que, hay más sal por unidad de volumen de agua producto y en consecuencia mayor salinidad en ésta.

1.3.2. Temperatura

Parámetro al cual se realiza el proceso y éste variará en función del lugar geográfico y época del año en que se realiza el tratamiento. Las membranas pueden soportar temperaturas de hasta 45°C. En todo sistema de ósmosis inversa hay una temperatura máxima y mínima de operación, el límite inferior para todas las membranas es 0°C y los límites superiores lo establecen los fabricantes en 35-45°C.

Normalmente, el funcionamiento óptimo se produce a una temperatura de 24 a 27°C, aunque estas temperaturas pueden ser perjudiciales en caso de contaminación biológica, dado que se favorece el desarrollo de ésta.

Si la temperatura del agua se mantiene constante también se mantiene la productividad. En su paso por las bombas de alta presión, el agua puede elevar su temperatura 1 ó 2 grados; al aumentar la temperatura también lo hace el caudal debido a la menor viscosidad del agua con la temperatura aumentando la difusión a través de la membrana y también tiene lugar un descenso en el rechazo de las sales debido a un efecto dilatador del agua en la membrana, un incremento de la solubilidad de la sal en las membranas, o a ambos.

Sin embargo, la mayoría de las plantas de ósmosis inversa mantienen un flujo de permeado constante; esto es, un incremento en temperatura causará un incremento en la salinidad del permeado. Un incremento de 1°C puede incrementar la permeabilidad de las sales de 3-5% (Wilf y Klinko, 2001).

Este parámetro en el agua varía bastante no sólo en función de la zona, sino también se trate de aguas subterráneas, superficiales o de mar; incluso de la época del año que se encuentre. En nuestras latitudes las temperaturas medias del agua de mar varían entre 18 y 24°C entre el invierno y el verano (Medina, 2000).

La influencia de la temperatura en el funcionamiento de las membranas es importante desde tres puntos de vista; por lo que, deben ser tomadas en cuenta:

- La solubilidad de determinadas sales aumenta con la temperatura; es decir, a temperaturas más elevadas se reducen riesgos de precipitación
- La temperatura influye en la viscosidad del agua y en la dilatación de los materiales que constituyen las membranas; por lo que, deben tomarse en cuenta en el diseño
- La elevación de la temperatura favorece la actividad biológica de los microorganismos que ocasionan el ensuciamiento de las membranas.

1.3.3. Membrana de desalación

La membrana de desalación está definida por una serie de parámetros técnicos que son las herramientas que se utilizan para el diseño de una instalación, con la finalidad de realizar una estimación o proyección de la calidad del agua que se desea obtener.

- **Rechazo**

Es considerada la característica principal de la membrana y la que permite definir su campo de aplicación en relación con el agua que se desea tratar. Se debe tener en cuenta que el diseño de una instalación de membranas depende tanto de la calidad del agua que se desea tratar como de la que se quiere obtener.

Actualmente, no existe una membrana que elimine el 100% de las sales contenidas en el agua, pero el desarrollo técnico cada vez se acerca más a esta cifra. Los parámetros que caracterizan a la membrana desde este punto de vista son:

★ Paso de sales

Se define como el porcentaje de sales que pasa a través de la membrana; es determinado midiendo la concentración de sales del agua de alimentación y del agua producto y se aplica la ecuación (1.1):

$$Ps = (Cp/Ca) 100 \dots\dots\dots (1.1)$$

Donde:

Ps = Paso de sales (%)

Cp = Concentración de sales en el producto o permeado

Ca = Concentración de sales en la alimentación

★ Rechazo de sales

Se define como el porcentaje de sales que rechaza la membrana y se determina a partir del paso de sales mediante la ecuación (1.2) (Bartels *et al.*, 2005):

$$Rs = 100 (Ca-Cp)/Ca = 100 (1-Cp/Ca) \dots\dots\dots (1.2)$$

Donde:

Rs = Rechazo de sales (%)

Cp = Concentración de sales en el producto o permeado

Ca = Concentración de sales en la alimentación

● **Conversión o recobro**

Es una relación, expresada en porcentaje, del caudal que puede desalarse a partir de un determinado caudal de alimentación a la instalación.

Conforme aumenta la conversión de una instalación, se aprovecha más el agua a tratar y se reduce en consecuencia el caudal o volumen de salmuera que hay que eliminar. La membrana rechaza una cantidad o porcentaje fijo de sales que se concentra en la salmuera; por lo tanto, cuanto menor sea el caudal del rechazo más concentrado será éste. Es decir, que la conversión está limitada por la concentración de sales en la salmuera o dicho de otro modo por el coeficiente de solubilidad de las sales presentes en la salmuera.

Todas las sales se disuelven en agua, pero su poder de dilución es limitado y está determinado por el índice o coeficiente de solubilidad de cada sal; una vez que se rebasa dicho coeficiente la sal empieza a precipitar en la solución. Para el caso de membranas de ósmosis inversa el problema incrementa por el hecho de que esa precipitación se produce sobre la superficie de las mismas provocando una obstrucción de los poros.

La conversión o recobro es un importante indicador de la ejecución de la ósmosis inversa; la conversión o recobro de una membrana o un sistema de ósmosis inversa está dada por la ecuación (1.3) (Rahardianto *et al.*, 2006):

$$R (\%) = (Q_p/Q_a) \cdot 100 \dots\dots\dots(1.3)$$

Donde:

R = Recuperación o recobro (%)

Q_p = Flujo de permeado o producto (m^3/h)

Q_a = Flujo de alimentación (m^3/h)

- **Factor de ensuciamiento (*fouling factor*)**

Las condiciones físicas y/o químicas del agua a tratar producen un ensuciamiento importante en las membranas, que disminuyen su desempeño; esto debe tenerse en cuenta en el diseño y se refleja en lo que se conoce como factor de ensuciamiento.

Este índice es un número, menor a la unidad, que trata de expresar el deterioro de las membranas cada año tanto en su caudal como en el rechazo de sales, a consecuencia del uso.

Parámetro o coeficiente teórico empleado por fabricantes, aunque bastante subjetivo, permite la obtención de un margen de seguridad en el funcionamiento de la instalación.

1.3.4. Calidad del agua a tratar

Con respecto a este grupo, existen dos principales subgrupos de factores de influencia del proceso de ósmosis inversa:

- Características del agua a desalar
- Pretratamientos aplicados a la misma para su tratamiento con el proceso de ósmosis inversa.

A continuación se describen estos dos grandes subgrupos:

1.3.4.1. Características del agua de mar para proceso de desalación

El diseño y la operación de las plantas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa dependen fuertemente de la calidad del agua de mar a tratar, el agua a desalar contiene una variedad de elementos causantes de la salinidad del agua y no todos se encuentran en las mismas proporciones; por lo que, es conveniente analizar algunos aspectos del agua a desalar que pueden influir en la forma de realizar el diseño y/o en precauciones que deben tomarse para lograr un funcionamiento continuo sin alteraciones considerables de la instalación.

Con una escasez a nivel mundial de agua convencional, la necesidad de usar fuentes no convencionales para generar agua potable está incrementando. El agua de mar es, por supuesto, la fuente no convencional más conocida (Van Hoof *et al.*, 2001).

1.3.4.1.1. Salinidad del agua de mar

Se denomina salinidad de un agua al contenido total de sales en la misma; es necesario saber qué tipo de agua se tratará, no es lo mismo un agua de mar con un contenido en sales totales de 40,000 mg/L que una salobre de 4,000 mg/L. Un agua con una salinidad media de 2,000 mg/L tiene una aplicación o comportamiento diferente en función de los iones que determinen esa salinidad (cloruros, carbonatos o sulfatos).

En la tabla 1.7 se presenta un espectro de las diferentes salinidades que puede tener un agua; indica las grandes variaciones a que puede estar sometida.

Tabla 1. 7. Espectro de salinidades de diferentes tipos de agua

Espectro de salinidades SDT	Salmuera	300,000 mg/L
	Agua de mar	30,000 mg/L
	Agua salobre	3,000 mg/L
	Agua potable	300 mg/L
	Agua industrial	30 mg/L
	Agua desionizada	3 mg/L
	Agua pura de calderas	0.3 mg/L
	Agua ultrapura	0.03 mg/L

La salinidad se expresa como residuo seco a 105°C o SDT y se mide en ppm o mg/L.

La conductividad eléctrica es la facilidad o habilidad que tiene una sustancia para conducir la corriente eléctrica; cuanta mayor cantidad de elementos disueltos contenga, más conductora será. La conductividad eléctrica de un agua no es un parámetro constante sino que depende de la temperatura, aumentando su valor al hacerlo ésta.

A medida que aumenta la conductividad de un agua, también lo hace su poder de corrosión, es decir, aguas con alta conductividad son muy corrosivas. Las unidades de conductividad que se utilizan son mS/cm o µS/cm.

Lógicamente existe una relación entre salinidad y conductividad eléctrica (CE), lo que permite el paso inmediato de una a otra unidad, aunque dicha relación no es rigurosamente fija y exacta.

Por ejemplo, en un agua natural el coeficiente de paso aproximado entre una y otra magnitud es de 0.64 o múltiplos de este valor según unidades elegidas, como se presenta en la ecuación 1.4:

$$\text{SDT (mg/L)} = \text{CE (}\mu\text{S/cm)} \times 0.64 = \text{CE (mS/cm)} \times 640 \dots\dots\dots (1.4)$$

Pero esta relación es diferente en otros tipos de aguas, se encuentra en función de la composición química de ésta. En las aguas desaladas por ósmosis inversa, dichas aguas contienen más sodio y cloruros que calcio, magnesio y sulfatos; por lo que, las membranas rechazan mejor los iones divalentes o trivalentes que los monovalentes, las concentraciones de los iones divalentes y trivalentes suele ser de 2.13 y 2.14 µmho/cm.

Por esta razón, el SDT de un agua producto puede obtenerse de forma aproximada, dividiendo su conductividad entre 2 o multiplicando por 0.5 (valores de 0.51 a 0.53 son más exactos). Por lo que, la forma más exacta para determinar esta relación es tomar una muestra de agua y determinar la salinidad del agua en laboratorio y medir la conductividad instantánea, estableciendo entre ambos resultados el coeficiente de paso adecuado.

Como ejemplo de salinidades promedio de distintas zonas podemos mencionar entre otras:

- 28,000 mg/L en el Báltico
- 34,000 mg/L en el Mar del Norte
- 35,000 mg/L en el Atlántico Sur
- 36,000 mg/L en el Mediterráneo
- 38,000 mg/L en las Islas Canarias
- 42,000 mg/L en Arabia Saudita
- 44,000 mg/L en el Mar Rojo.

1.3.4.1.2. Composición química del agua del mar

Existe una gran variedad de elementos que puede contener el agua y que son los causantes de la salinidad; por lo que, analizaremos cuales son estos elementos, su origen o las causas que provocan su presencia en el agua entre otros efectos (anexo A) (Medina, 2000).

En la tabla 1.8 se muestran análisis típicos de agua de mar de distintas zonas, en la cual se puede observar de forma más precisa la variación de la salinidad y el contenido de diferentes iones entre cada región.

Tabla 1. 8. Análisis de aguas de mar (Fritzmann *et al.*, 2007; Lenntech, 2008; Medina, 2000)

	Golfo Árábigo	Mediterráneo	Golfo Pérsico	Omán-Mascate	Pacífico	Atlántico
	(mg/L)					
Na⁺	17,572	11,781	12,300	11,800	10,556	11,520
K⁺	486	514	470	490	380	460
Ca⁺⁺	620	962	570	472	400	450
Mg⁺⁺	2,098	1,021	1,700	1,355	1,262	1,320
Cl⁻	25,600	21,312	24,500	21,772	18,980	20,600
SO₄⁼	4,277	3,162	3,400	2,880	2,649	2,910
CO₃H⁻	122	195	185	160	140	134
pH	8.2	6.33	8.2	8.06	7.6	8.1
TDS	55,775	38,951	47,000	39,510	34,483	37,830

La tabla 1.8 muestra que los iones predominantes en agua de mar a nivel mundial son el Cl⁻ (18,000-26,000 mg/L) y el Na⁺ (10,000-18,000 mg/L) seguido de SO₄⁼, Mg⁺⁺, Ca⁺, K⁺, de acuerdo a sus concentraciones en agua de mar.

Para agua de mar, las variaciones se producen en el contenido total de sales entre unas y otras zonas de nuestro planeta aunque no en el tipo de iones; sin embargo, para un lugar determinado las características del agua de mar varían muy poco no sólo según la época del año, sino a lo largo de los años.

1.3.4.1.3. pH

Es el logaritmo negativo de la concentración de iones hidronio del agua, su valor es un índice indicativo de las características del agua.

Para desalación por membranas, ejerce dos tipos de acciones:

- Influye en la solubilidad de los carbonatos y regula por tanto su precipitación
- Limita el empleo de membranas de acetato de celulosa debido a valores inferiores y superiores a 5 pueden experimentar hidrólisis.

La Reglamentación considera que las aguas para consumo humano deben tener un pH entre 6.5-8.5.

El rechazo de sales de las membranas depende en cierta medida del pH, cada material tiene un pH al que el rechazo es máximo, no todas las membranas reaccionan de igual forma a la variación del pH del agua de alimentación.

Las membranas fabricadas con acetato de celulosa son muy sensibles a estas variaciones; por lo que, actúan entre valores de pH de 4 a 7 de forma continua y durante períodos reducidos pueden separarse ligeramente de estos valores de pH. Fuera de estos valores recomendados de pH las membranas se hidrolizan y pierden de forma irreversible sus características.

La membrana de poliamida que es menos sensible, funciona sin mayores problemas entre valores de pH de 4 a 11 y durante períodos cortos soporta valores de pH de 3 a 12.

Normalmente hay un valor óptimo de pH al que la membrana tiene el mayor rechazo de sales; por lo que, se debe trabajar lo más cercano posible a este valor (para membrana de acetato de celulosa el pH óptimo de funcionamiento es 5). A medida que nos separamos de este valor el rechazo de sales se deteriora, es decir, la calidad del agua producto es inferior (Medina, 2000).

1.3.4.2. Procesos de pre y post-tratamiento de la ósmosis inversa para la desalación de agua de mar

Los depósitos ocurren cuando el rechazo de contaminantes no es transportado de la superficie de las membranas a la solución de concentrado. Los tipos de contaminación que generalmente se presentan en la superficie de las membranas de ósmosis inversa son incrustación, contaminación orgánica, coloidal y mineralización. Para estos tipos de contaminación existen pretratamientos bien establecidos por adición de reactivos químicos como polímeros anti-incrustantes o desinfectantes y métodos químicos de limpieza (Glueckstern *et al.*, 2002).

Los tratamientos de agua de mar se clasifican principalmente en:

- ✓ Pretratamientos
- ✓ Post-tratamientos

A continuación se describen estos tipos de tratamientos para el agua de mar:

➤ Pretratamientos y post-tratamientos

La obtención de un efluente de calidad con procesos de pretratamiento mejora la operación de plantas desaladoras de ósmosis inversa; con apropiado pretratamiento al agua de alimentación, el potencial de contaminación del agua de mar puede ser reducido; es aplicado para mejorar la supervivencia de las membranas de ósmosis inversa (Chua *et al.*, 2003).

Como se muestra en la tabla 1.8 el agua que se va a desalar contiene una serie de componentes orgánicos y no orgánicos que deben ser controlados dentro de ciertos límites para que pueda ser aplicada a unos elementos tan sensibles como las membranas, sin que produzca un deterioro en las mismas. Por tanto debe acondicionarse sometiéndola a una serie de pretratamientos que se clasifican en dos tipos:

- Físicos: para la remoción de elementos no disueltos (sólidos suspendidos, algas y materia orgánica no disuelta principalmente) que causan la obstrucción directa de la membrana
- Químicos: para la remoción de elementos disueltos (sales, ácidos, bases) y no disueltos (microorganismos) que ataquen directamente a la membrana o que precipiten sobre la misma.

Posteriormente, el agua desalada requiere también tratamientos químicos (post-tratamientos), dado que su pureza la hace inadecuada en muchos casos para determinados usos, corrosiva para los depósitos en que se almacena o conductos por los que circula (Medina, 2000).

Los trenes convencionales de pretratamiento y post-tratamiento más empleados a nivel mundial para el proceso de ósmosis inversa se muestran en las figuras 1.15 y 1.16.

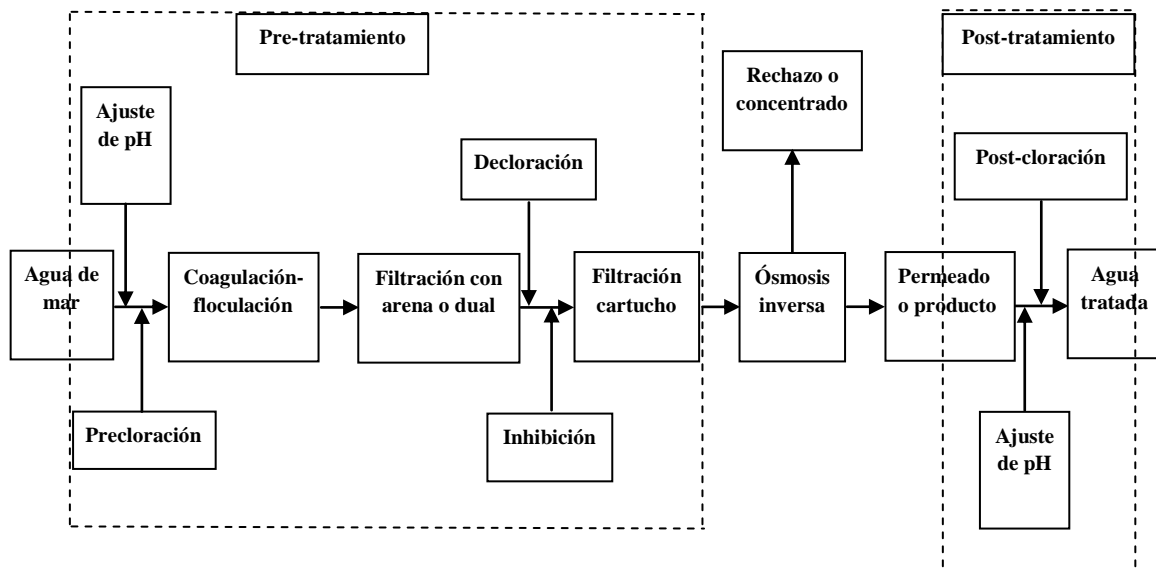


Figura 1. 15. Tren de tratamiento convencional coagulación-floculación-filtración para proceso de ósmosis inversa (Aboabboud *et al.*, 2007; Fritzmann *et al.*, 2007; Koutsakos *et al.*, 2007; Khawaji *et al.*, 2007).

El tren de pretratamiento convencional coagulación-floculación-filtración para el proceso de ósmosis inversa está constituido principalmente por una serie de procesos: ajuste de pH, precloración, coagulación-floculación, filtración dual, decoloración, inhibición (adición de anti-incrustantes), filtración cartucho. Posteriormente, se tiene al proceso de ósmosis inversa y post-tratamiento (ajuste de pH al agua producto o permeado y post-cloración).

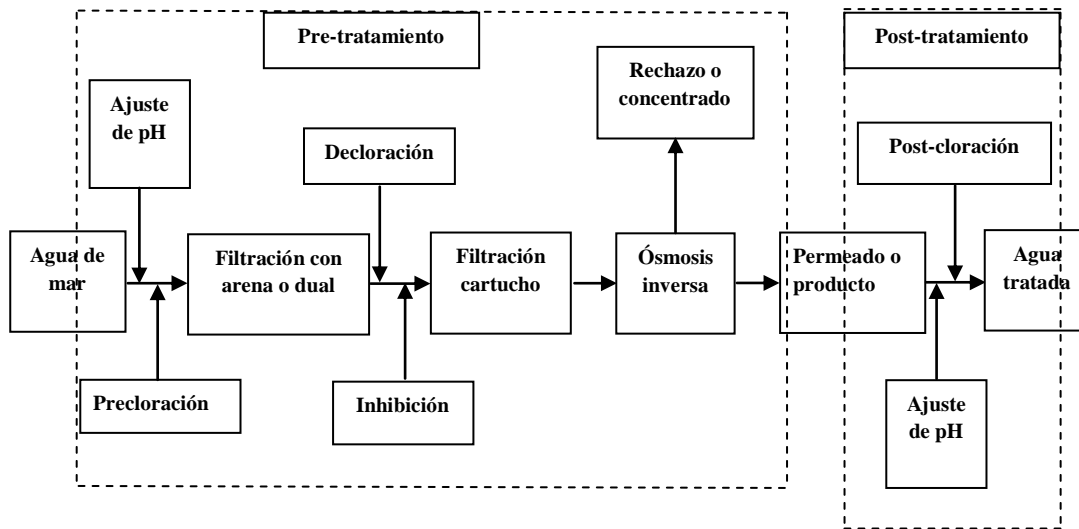


Figura 1. 16. Tren de tratamiento convencional filtración directa para proceso de ósmosis inversa (Elguera *et al.*, 2005; Pais *et al.*, 2007).

El tren de pretratamiento convencional filtración directa para el proceso de ósmosis inversa está constituido principalmente por los siguientes procesos: ajuste de pH, precloración, filtración con arena o dual, decoloración, inhibición, filtración cartucho. Posteriormente se tiene al proceso de ósmosis inversa y finalmente al post-tratamiento (ajuste de pH en agua producto y post-cloración).

En las figuras 1.15 y 1.16 se muestra en cuadros con líneas discontinuas los procesos que conforman tanto el pretratamiento como el post-tratamiento antes mencionados.

Cabe mencionar que, en los trenes de tratamiento convencionales mencionados en las figuras 1.15 y 1.16, no todos los procesos son aplicados básicamente; los procesos que son aplicados de base en pretratamiento son filtración con arena o dual y filtración cartucho; para post-tratamiento son ajuste de pH en agua producto y post-cloración para el caso de agua potable, existiendo variaciones para estos procesos convencionales.

Otros procesos para pretratamiento tales como ajuste de pH en agua cruda, precloración, coagulación-floculación, decoloración, inhibición, filtros de membranas son aplicados de manera variable en el pretratamiento de agua de alimentación a ósmosis inversa; es decir, dependiendo de la calidad de agua a tratar, estos procesos pueden ser aplicados o no aplicados. A continuación se describen los procesos básicos y los procesos variables en los pre y post-tratamientos.

Para los **procesos básicos en pretratamiento** se tiene:

1.3.4.2.1. Filtración

Los componentes físicos en suspensión del agua comprenden desde arenas hasta partículas coloidales; las partículas en suspensión proceden de erosión de terrenos, disolución de sustancias minerales y la descomposición de sustancias orgánicas; todos estos elementos deben removerse de los circuitos hidráulicos de la instalación o controlarse dentro de unos límites.

Para mejorar estos aspectos físicos del agua se emplean distintos procesos de filtración principalmente que cubre la fase de separación de sólidos contenidos en líquidos. El ensuciamiento debido a partículas es inhibido por pretratamiento a agua de alimentación para ósmosis inversa usando filtración con arena y filtración con cartuchos o filtración por membranas (Fritzmann *et al.*, 2007).

En muchas ocasiones la filtración debe mejorarse con la aplicación de otras técnicas como la decantación, coagulación-floculación y coagulación-floculación-decantación. Si los niveles de partículas son excesivos se recurre a una filtración más fina constituida fundamentalmente por la filtración por cartuchos.

Un nuevo campo de aplicación de ósmosis inversa es la combinación con tecnologías de membranas de baja presión tales como ultrafiltración o microfiltración; esta combinación puede obtener calidad de agua alta, es aplicada principalmente en casos especiales de instalaciones para desalar aguas residuales o industriales de elevada pureza (Fritzmann *et al.*, 2007), siendo su principal desventaja de esta combinación que no se aplican en condiciones normales debido a su alto costo.

Las partículas sólidas que arrastra el agua se pueden clasificar en los siguientes grupos por su tamaño como arena gruesa, arena fina, limo y arcilla. Éstos responden a dos grandes grupos para procesos de ósmosis inversa:

- Partículas coloidales (diámetro entre 0.3-1 micra)
- No coloidales (diámetro mayor a 1 micra).

El proceso de filtración o separación de sólidos debe ser muy exigente, ya que la sensibilidad de las membranas a los elementos sólidos del agua es elevada. Esto obliga a establecer una serie de etapas que responden a dos conceptos principales:

- Filtración gruesa
- Filtración más fina (cartuchos).

La filtración gruesa trata de hacer una separación de materiales de tamaños y estructuras determinadas, mientras que la segunda llega a separaciones del tamaño micrométrico.

Los equipos que normalmente se utilizan, de forma individual como conjunta, son:

- ✓ Filtros de arenas
- ✓ Filtros de cartuchos y bujías

- ✓ Filtros de precapa
- ✓ Filtros especiales.

A continuación se describe acerca de los diferentes tipos de filtros:

✓ **Filtros de arenas**

Se denomina así a los filtros que constan de una o más capas de material filtrante denominado arena. En ocasiones se trata de arena y diferentes materiales de granulometría variable que se colocan en capas una sobre otra de diferentes espesores denominados filtros duales.

En los filtros se introduce el agua por la parte superior y percola lentamente a través de las distintas capas, para recolectar el agua filtrada por la parte inferior. La velocidad de filtración depende de varios factores:

- Presión aplicada
- Granulometría utilizada
- Profundidad de la capa o capas de material

Los filtros utilizados pueden ser depósitos abiertos o cerrados, depositándose un material poroso que actúa como medio filtrante. Esto determina los dos sistemas fundamentales de filtros de arena existentes, abiertos o de gravedad y cerrados o de presión.

Además, por la forma en que se lleva a cabo el proceso de filtración, se puede hablar de filtración lenta y rápida. Los filtros lentos emplean velocidades de filtración muy bajas ($0.1-0.4 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$) lo que determina mayor empleo de espacio para su instalación. Éstos son más fáciles de operar y su limpieza es solamente con agua a contracorriente.

Los filtros rápidos operan a velocidades más altas que van desde $5-7.5 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ en filtros a gravedad y de $7-12 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ en filtros a presión. Sin embargo, pueden aumentar cuando el agua a tratar no es demasiado sucia.

Los filtros abiertos están constituidos por un depósito rectangular, la altura de la columna de agua necesaria para efectuar la filtración es de 1-1.5 m; por ello, la velocidad de filtración no es tan elevada. La figura 1.17 presenta un filtro abierto rectangular.



Figura 1. 17. Filtro abierto rectangular (Cerón, 2006).

Los filtros de presión aplicados en ósmosis inversa operan a $3.5-7.5 \text{ kg/cm}^2$ y pueden ser verticales u horizontales; son depósitos generalmente metálicos y en ocasiones plásticos. De igual forma que en los filtros abiertos, se colocan colectores o placas con boquillas que recolectan el agua que atraviesa el material filtrante (Medina, 2000). La figura 1.18 presenta algunos filtros cerrados.



Figura 1. 18. Tipos de filtros cerrados (Matrix, 2007).

★ Materiales filtrantes

Una simple capa de arena es suficiente para aguas sin demasiados problemas de turbidez como agua de pozo; cuando el agua es más problemática, se emplean filtros multicapa, formados por capas de distintos materiales, cuya selección requiere la realización de pruebas.

Suele haber al menos una o más capas de grava de distinta granulometría, que son colocadas en la parte inferior del filtro y sobre ellas se van colocando las sucesivas capas de distintas arenas. Los materiales más empleados son arena, granate, *green sand*, etc. y generalmente se deposita una capa de antracita en la parte superior siendo menos pesada que la arena y de mayor porosidad. El tamaño medio de estos materiales más usados son: antracita (0.8-1.2 mm), arena (0.5-0.8 mm), granate (0.4-0.6 mm) y magnetita (0.3-0.4 mm).

La granulometría de los materiales de filtración se determina mediante el tamizado a través de mallas de un tamaño determinado y se define por:

- Tamaño efectivo (D_{10}): diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 10% del material, en peso
- Coeficiente de uniformidad: se utiliza para evaluar la uniformidad del tamaño de las partículas de un material. Se expresa como la relación entre D_{60} y D_{10} (Lambe y Whitman, 2007)

En filtros lentos la arena suele tener un tamaño efectivo de grano de 0.35 mm, para filtros rápidos deben ser más gruesas aunque inferiores a 2 mm, con un coeficiente de uniformidad variable entre 1.3 y 1.6 mm.

Cuando se aplica una segunda capa, la antracita es el material preferido, siendo más porosa y angulosa que la arena, elimina las partículas más gruesas y permite el paso de las partículas más delgadas a la capa de arena más profunda.

Cuando se coloca una capa con mayor granulometría sobre otra capa con menor granulometría, se eliminan mejor las partículas más grandes, permitiendo una penetración más profunda y uniforme de las partículas más pequeñas. Esto se logra por ejemplo reemplazando entre 5-15 cm de la parte superior por unos 15-20 cm antracita (Medina, 2000). La figura 1.19 presenta los diferentes materiales filtrantes aplicados en la filtración.



Figura 1. 19. Materiales filtrantes empleados en filtros para pretratamiento del influente para la ósmosis inversa (Interlabco LTDA, 2009).

La filtración media granular incluye materiales como arena, antracita, piedra pómez, grava y granate. A menudo, una combinación de estos materiales es usado en capas en el lecho de filtración tomando ventaja de los diferentes tamaños de partícula (Elguera y Báez, 2005). La filtración media presurizada es más común en pretratamiento para ósmosis inversa y típicamente puede reducir el IDE del agua de alimentación a un factor de 2 (Morenski, 1992).

El agua a tratar viene identificada por una serie de parámetros desde el punto de vista físico, que son los que imponen las membranas. Los más importantes son el potencial Z, la turbidez y el índice de colmatación o ensuciamiento (IDE) (Medina, 2000). Este último es considerado un parámetro muy importante para la operación de las membranas, ya que se define como el índice IDE el cual describe el potencial de ensuciamiento del agua de alimentación; el IDE es usado

para estimar este potencial causado por materia orgánica suspendida fina o coloides inorgánicos. Los fabricantes de membranas recomiendan IDE entre 1-4 (Fritzmann, 2007; Hydranautics, 2003; Lenntech, 2008).

Cuando los huecos del material filtrante se obstruyen a causa de las partículas que arrastra el líquido que se filtra, es necesario realizar una limpieza. En instalaciones desaladoras la limpieza se realiza cuando la pérdida de carga se encuentra entre 0.5-1 kg/cm² en filtros a presión y 0.3-0.8 kg/cm² en filtros abiertos. La descripción del sistema de retrolavado y los parámetros de diseño para filtros se realiza en el anexo B.

✓ **Filtros de cartuchos**

Los filtros citados anteriormente sólo alcanzan un nivel de filtración que es insuficiente para las membranas; por lo que, la filtración sobre cartuchos es imprescindible en instalaciones de ósmosis inversa.

Con este tipo de filtración se remueven partículas de pocas micras y es conocida como filtración fina para protección de las membranas desaladoras.

Los fabricantes de membranas imponen el nivel de filtración de 5 micras como condición indispensable para garantizar el funcionamiento continuo de éstas. Los cartuchos están formados por un eje hueco con perforaciones laterales generalmente de material de PVC, sobre el que se enrolla un hilo, que es el que garantiza el tamaño de poro acorde con las características de separación del filtro. Se logra con una selección del espesor del hilo, el tipo de enrollamiento y la tensión o presión que se aplica al mismo. Las dimensiones de estos cartuchos son variables en longitud entre 0.25 m que es la unidad tipo y hasta 1.25 m, se pueden construir a medida según la necesidad del diseño.

Las partículas retenidas por los cartuchos incrementan las pérdidas de carga del mismo; es decir, cuando alcanza un valor determinado se procede a su sustitución ya que éstas no se desprenden fácilmente como ocurre en otros filtros. La figura 1.20 presenta los tipos de filtros cartuchos y filtro industrial de cartuchos (Medina, 2000).



Figura 1. 20. Tipos de filtros cartucho y filtro industrial de cartuchos (FMP, 2009).

La filtración por cartucho es usado como último paso del pretratamiento convencional para ósmosis inversa. Los filtros cartucho son usualmente entre 1-10 µm (Elguera y Báez, 2005; Morenski, 1992) y tiene como acción final remover partículas que pasan a través de la

filtración media; materia particulada mayor de 5-10 μm que propician la contaminación de las membranas de ósmosis inversa (Morenski, 1992). La descripción de los filtros precapa y especiales se realiza en el anexo C.

Para los **procesos variables en pretratamiento** se tiene:

Los procesos que son aplicados de forma variable en el pretratamiento de agua de mar para ósmosis inversa (ajuste de pH en agua cruda, precloración, coagulación-floculación, dechloración, inhibición, filtración por membranas) se describen a continuación:

Los **pretratamientos** químicos principales que se aplican a un agua que se va a desalar son ajuste de pH a agua cruda, desinfección, dechloración e inhibición. Son empleados para controlar dos tipos de contaminación que afectan a las membranas de OI:

Contaminación: se realiza a causa de contaminantes orgánicos y biológicos; se produce de una forma natural por descomposición de distintos organismos presentes en la naturaleza dando lugar a compuestos de naturaleza coloidal predominando el nitrógeno y el carbono, conocida como materia orgánica.

Sobre la materia orgánica se desarrolla una serie de microorganismos, hongos, bacterias y virus; los cuales pueden atacar a las membranas o desarrollarse sobre ellas ya que la composición química de las mismas constituye un excelente medio nutritivo para su desarrollo.

Procesos químicos: que ocasionan reacciones químicas que producen precipitados insolubles que afectan a la propia estructura de la membrana; se producen como consecuencia de elementos químicos o iones componentes naturales del agua o los que de forma accidental se incorporan a la misma, que originan una serie de reacciones químicas que afectan a las membranas. Estos ataques se dan por dos mecanismos:

Oxidación: producida por la presencia de oxígeno disuelto en el agua o de algún elemento oxidante que forma parte de la misma o se incorpora posteriormente.

Hidrólisis: fenómeno de descomposición que afecta a los grupos acetilo, es decir, membranas derivadas de polímeros de acetato de celulosa (Medina, 2000).

Para controlar los citados tipos de contaminación se emplean los siguientes pretratamientos químicos:

1.3.4.2.2. Ajuste de pH al agua de mar cruda

El agua a desalar tiene por lo general un pH elevado, en estas condiciones la operación de la membrana no es el óptimo y la eficiencia se reduce. Además ha elevado pH se puede producir precipitados afectando el proceso. Por ello, la acidificación del agua de influente se emplea con dos objetivos:

- Modificar el agua en un pH óptimo para la membrana
- Prevenir la precipitación de carbonato cálcico.

Comúnmente se aplica ácido sulfúrico, eliminando la alcalinidad del bicarbonato y previniendo la precipitación del carbonato; sin embargo, incrementa la concentración de iones sulfato y la tendencia a la formación de precipitados de sulfato de calcio. Por lo que, para evitar esto se

agrega algún anti-incrustante o secuestrante que suelen ser derivados del fosforo como el hexametáfosfato sódico o polielectrolitos (poliacrilatos, polimaleatos, etc.).

1.3.4.2.3. Desinfección

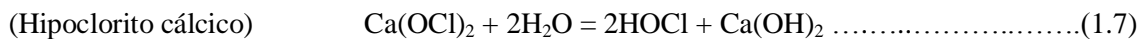
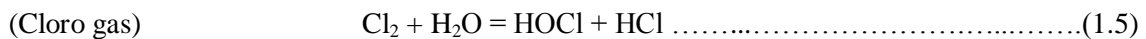
Aplicada para el control de la contaminación bacteriológica o por algas. El proceso convencional más usado es la cloración, aunque existen los no convencionales como la ozonación y la luz UV (anexo D):

✓ Cloración

La práctica habitual en los pretratamientos de ósmosis inversa para combatir el ensuciamiento biológico de las membranas se da por la utilización de diversos derivados clorados; siendo el sistema más empleado.

La dosificación de cloro en el sistema se realiza de dos formas, mediante cloro gas o con soluciones líquidas de hipoclorito sódico o cálcico. Tanto en uno como en el otro caso, la base del proceso de desinfección es la formación del ácido hipocloroso (HOCl) que posee una elevada acción biocida (White, 1978).

El cloro adopta tres formas distintas al añadirse al agua: cloro elemental, ácido hipocloroso (HOCl) o ión hipoclorito (OCl⁻); por tanto, las reacciones básicas (ecuaciones de reacciones 1.5, 1.6 y 1.7) de la cloración según sea el producto empleado son:



La eficiencia como desinfectante del cloro se determina por el cloro libre disponible o residual, siendo el cloro que queda en el agua después de un cierto tiempo de contacto; puede reaccionar química y biológicamente como ácido hipocloroso o como ión hipoclorito. La eficiencia está relacionada con la cantidad de ácido hipocloroso sin disociar presente en la solución, cuya acción biocida es 100 veces mayor que la del ión hipoclorito.

La concentración del ácido hipocloroso también depende de:

pH: la concentración del ácido hipocloroso disponible varía notablemente con pequeños cambios de pH. En un agua a pH 7 y 20°C el ácido hipocloroso sin disociar es de 79.29%, mientras que a pH 8 se reduce hasta 29.67%.

Temperatura: si aumenta la temperatura, aumenta la disociación del ácido hipocloroso y aumenta la concentración del ión hipoclorito disminuyendo la acción bactericida del cloro.

Fuerza iónica del agua: cuando la concentración de sales del agua aumenta también lo hace la disociación del ácido hipocloroso.

La demanda de cloro es la cantidad de cloro que puede consumir el agua para su desinfección y la destrucción de la materia orgánica. En consecuencia, es la porción de cloro añadido al agua en un período de tiempo, que se convierte en cloro no disponible.

Los oxidantes son típicamente dosificados a una concentración que permita obtener una concentración residual a través del resto del sistema de pretratamiento y prevenir crecimiento biológico. Por ejemplo, el cloro es dosificado para permitir una concentración de cloro residual de 0.5-1 mg/L (Reverter *et al.*, 2001).

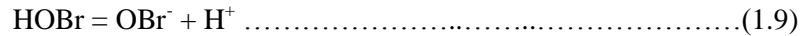
Los resultados son más satisfactorios si se mantiene un nivel de cloro libre de 0.3 mg/L, precisándose un tiempo de contacto de por lo menos 25 segundos. La mayor desventaja de este sistema es la dificultad de control, ya que puede producirse aplicaciones de cloro excesivas que afectan a las membranas.

La composición del agua de mar es más compleja detectando en un análisis la presencia de 75 elementos químicos en concentraciones muy variables, se han identificado cientos de compuestos orgánicos y un elevado contenido de sólidos disueltos y elementos móviles como partículas coloidales, organismos unicelulares, entre otros. Por todo ello, el comportamiento con respecto a la cloración del agua dulce es algo diferente.

El ión bromuro que se encuentra en una concentración de hasta 70 mg/L, su presencia en grandes cantidades interfiere la acción biocida del cloro. Cuando se clora el agua de mar, una parte del bromuro es oxidado para formar ácido hipobromoso e iones hipobromito, comportándose de manera similar a sus equivalentes clorados como se muestra en las ecuaciones de reacción 1.8 y 1.9.



A su vez el ácido hipobromoso se disocia en:



En consecuencia, aunque los desinfectantes reales del agua de mar son el bromo y sus derivados, se emplea normalmente el término cloro residual para describir el oxidante halógeno residual presente.

La utilización de cloro es el sistema más extendido y económico; sin embargo, supone un riesgo por su posibilidad de ataque a las membranas. Por lo que, se tienen algunas alternativas como es el bisulfito o metabisulfito de sodio que son empleados como agentes decloradores o desinfectantes siendo su acción no tan intensa como la del cloro; también se emplea el sulfato de cobre y permanganato de potasio para el control de algas.

1.3.4.2.4. Coagulación-Floculación

Si es insuficiente el tratamiento del medio filtrante antes de pasar a desalar el agua por filtro cartuchos, es recomendable aplicar coagulación-floculación en línea.

El objetivo de la **coagulación** es la desestabilización de las partículas en suspensión y facilitar su aglomeración; esto se realiza mediante la inyección y dispersión rápida de los productos químicos. Mientras que la floculación tiene por finalidad favorecer, mediante un mezclado lento, el contacto entre las partículas desestabilizadas; estas partículas se aglutinan para formar un flóculo que puede eliminarse por decantación o filtración fácilmente.

La coagulación, se refiere a una serie de operaciones químicas y mecánicas mediante las cuales se aplican coagulantes y éstos ejercen su acción. Estas operaciones implican dos fases distintas:

Durante el **mezclado**, el coagulante aplicado se dispersa en el agua tratada rápidamente mediante una agitación violenta.

Floculación, agitación del agua a menores velocidades y períodos más largos, formándose pequeñas partículas que se aglomeran en flóculos definidos y con suficiente tamaño para sedimentar.

Ambos términos se refieren, tanto a procesos químicos como físicos.

El proceso requiere ser optimizado, lo cual es necesario conocer los factores que lo determinan:

✓ pH

Es la variable más importante, para cada tipo de agua existe un intervalo de pH para el que la coagulación tiene lugar rápidamente; este intervalo es función del coagulante utilizado, de su concentración y de la composición del agua a tratar. Para sales de hierro y aluminio el intervalo se extiende entre 5.5-7.8.

✓ Sales disueltas

La coagulación con sales de hierro y aluminio está más influida por los aniones que por los cationes; por lo que, los iones sodio, calcio y magnesio apenas ejercen influencia. Los aniones en cambio amplían el intervalo de pH óptimo hacia la acidez.

✓ Temperatura

Si este parámetro disminuye, sobre todo hasta valores bajos, el flóculo decanta más difícilmente y tiene tendencia a penetrar más profundamente en los filtros.

✓ Coagulante

Para agua de mar, el coagulante más aplicado es el cloruro férrico debido a su alta eficiencia y reducido precio. Los polímeros catiónicos son más frecuentes por sus menores dosis de aplicación y fácil manipulación.

✓ Mezcla

Se realiza en dos etapas:

- La mezcla es enérgica y de corta duración, dispersando los productos en su totalidad del volumen a tratar, realizándose en zonas de turbulencia creadas especialmente para ello
- La mezcla es lenta y con mayor período de duración favoreciendo el contacto entre las partículas para floculación, la turbidez y el color.

✓ Turbidez

Se debe a partículas de diámetro variable; por lo que, su coagulación se realiza con mayor facilidad que si se tratara de partículas de diámetros similares.

✓ Color

El 90% de las partículas causantes del color tiene un diámetro superior a 3.5 nm siendo bastante menores que las causantes de la turbidez y poseen cargas negativas en su superficie. El pH óptimo para su eliminación varía entre 4 y 6.

El pretratamiento convencional para ósmosis inversa principalmente usando adición de químicos y filtración con arena seguido por seguridad de un sistema de filtración fina es ampliamente usado en las plantas de ósmosis inversa con la finalidad de obtener el más bajo valor de IDE y remover sólidos suspendidos y excesiva turbiedad (Wolf *et al.*, 2005).

1.3.4.2.5. *Decloración*

Hoy en día, la mayoría de las membranas de ósmosis inversa en el mercado están fabricadas de poliamidas aromáticas y tal estructura es sensible a los ataques químicos por cloro, ya que puede causar deterioro irreversible en las membranas; si el cloro es usado como desinfectante, el bisulfito de sodio o el carbón activado son usados al final del sistema de pretratamiento para remover el cloro residual existente en el agua (Hydranautics, 2003). El bisulfito de sodio es el menos costoso y más empleado en plantas de desalación (Morenski, 1992).

Los compuestos de azufre son los más empleados en la decloración y dentro de éstos se encuentran las soluciones acuosas de sulfito (bisulfito, metabisulfito, etc.).

El carbón activado es un método eficaz, en forma granular se emplea como medio filtrante y es mucho más eficaz resultando una de las formas más aplicables. Simultáneamente a la decloración también elimina compuestos orgánicos.

1.3.4.2.6. *Inhibición*

La finalidad es aumentar la solubilidad de los distintos iones en el agua, en ocasiones hasta niveles de varias veces su solubilidad normal. Su actuación se centra principalmente en la inhibición de precipitados de sales derivadas de los sulfatos (CaSO_4 , BaSO_4 , SrSO_4 , etc.).

El primer inhibidor utilizado fue el hexametáfosfato sódico (NaPO_3)₆ siendo los polifosfatos los productos más empleados. Posteriormente, se han desarrollado diferentes polímeros orgánicos de síntesis mejorando su efectividad; aunque aparecen con diferentes nombres comerciales se trata de ácidos poliacrílicos, polímeros de metacrilato, ácidos policarboxílicos, poliacrilamidas y ácidos aminoalcalifosfóricos.

El mecanismo de inhibición no es muy claro, pero una de sus características es el poder secuestrante de la capacidad de formar quelatos estables con cationes polivalentes. Por lo anterior, a los inhibidores se les conoce como productos secuestrantes.

Las dosificaciones óptimas son muy pequeñas en relación con las concentraciones de los cationes susceptibles de precipitación. La aplicación del tratamiento de inhibición tiene un costo químico bajo, el manejo es sencillo y ocasionan pequeñas corrosiones de los equipos.

1.3.4.2.7. *Filtros de membranas*

Su aplicación es restringida por elevados costos de instalación y mantenimiento. Considerados filtros especiales ya que utilizan membranas parecidas a las de ósmosis inversa pero con un

tamaño de poro mucho mayor, son empleadas como pretratamiento para equipo de ósmosis inversa.

★ Microfiltración (MF)

Membranas cuyo tamaño de poro es de 0.1-0.2 micras. Efectúan la separación de partículas, incluido sólidos en suspensión y coloides grandes.

El paso de agua se realiza desde el exterior hacia el interior de la membrana, depositándose las partículas sobre la superficie de ésta, obstruyendo los poros y creando una pérdida de carga que obliga a su limpieza.

El tamaño de los poros retiene también bacterias, pues se aglutinan unas con otras adquiriendo un tamaño superior a los poros.

La MF permite su utilización con aguas muy sucias y una carga orgánica importante, como las aguas residuales. Sin embargo, cuanto más sucia el agua más rápido se ensucian las membranas; por lo que, los períodos de limpieza se acortan dando lugar a paradas más frecuentes del equipo, un incremento de los costos energéticos y una pérdida de eficiencia de la instalación.

El material constituyente de las membranas es el polipropileno, que no soporta bien la cloración.

★ Ultrafiltración (UF)

La percepción general de la UF como pretratamiento para desalación del agua de mar con ósmosis inversa es técnicamente factible pero económicamente no viable (Clunie *et al.*, 2005).

Membranas con tamaño de poro de 0.01 micras. Estas membranas separan partículas, proteínas y sustancias orgánicas con un peso molecular entre 1,000 y 100,000. Esta clase de membranas puede ser tanto de fibra hueca como de enrollamiento en espiral. La diferencia más importante entre ambas es el diámetro de la fibra, el material constituyente y la forma de filtrado ya que en éstas se realiza desde el interior hacia el exterior.

La figura 1.21 muestra en general, la capacidad de separación de los sistemas de filtración con membranas con respecto a la presión aplicada en el tratamiento de agua (Rautenbach *et al.*, 2003).

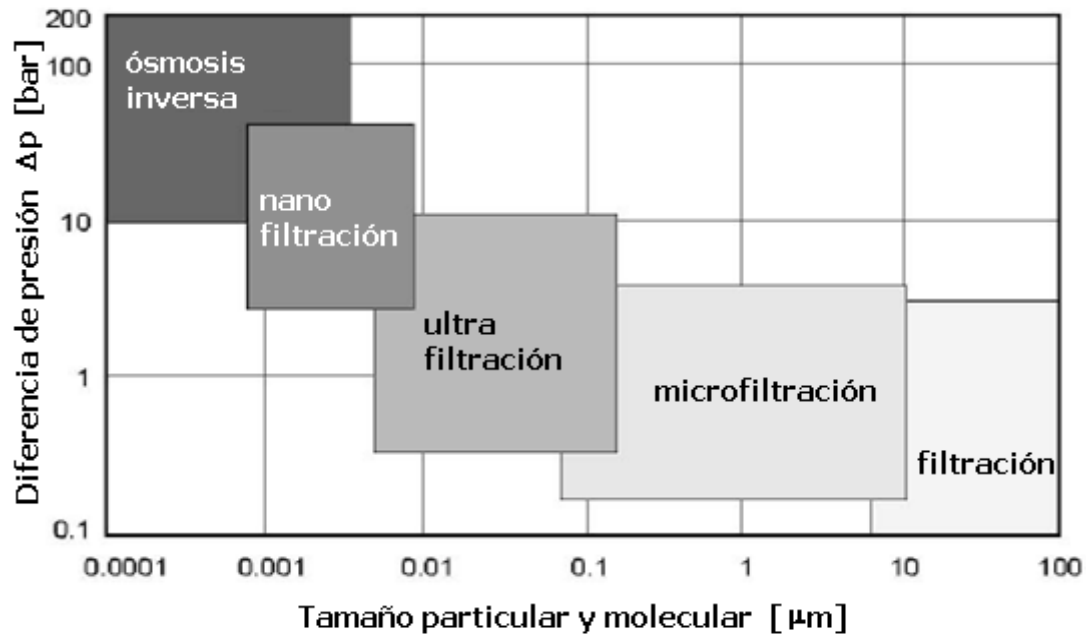


Figura 1. 21. Capacidad de separación de partículas y moléculas de procesos de membrana (Rautenbach *et al.*, 2003).

Existen otros pretratamientos empleados para problemas de calidad de agua específicos tales como aceites y grasas, ácido sulfhídrico, hierro, sílice; estos pretratamientos se describen en el anexo E.

Para los **procesos básicos en post-tratamiento** se tiene:

Existen dos aspectos principales que deben destacarse en un agua desalada:

- Su bajo pH, que la hace corrosiva y puede ser causa de ataques a tuberías como depósitos de almacenamiento.
- Su fuerte desequilibrio iónico, dado que apenas contiene iones bivalentes.

Por ello, se deben aplicar **post-tratamientos** químicos para lograr su neutralización y su enriquecimiento en calcio en cumplimiento con la Reglamentación Técnico Sanitaria vigente en la actualidad en la Unión Europea (Lynn, 1986).

Los procesos principales a los que se somete un agua desalada son:

1.3.4.2.8. Ajuste de pH al agua producto o permeado

El agua desalada por ósmosis inversa tiene un pH bajo (5.5), bajo en calcio y alcalinidad debido al elevado rechazo de estos iones siendo un agua desequilibrada. Para estabilizarla se lleva a su equilibrio de saturación de CaCO_3 llevando el pH a 6.5-8 y posteriormente desinfectarla si se va a emplear para consumo humano.

La estabilización se consigue principalmente agregando cal o CaCO_3 para incrementar la dureza, alcalinidad y pH (Khawaji *et al.*, 2007). Otra base como la sosa cáustica puede ser usada para ajustar el pH (El-Ramly y Peterson, 1999). La estabilización también se puede obtener por mezcla con otras aguas o por desgasificación siendo menos empleados.

1.3.4.2.9. *Post-cloración*

El agua a desalar ha sido desprovista de sus características oxidantes por la dosificación de bisulfito de sodio; por lo que, en el producto no existe rastro de cloro residual. Antes de usar, el agua suele almacenarse en algún depósito existiendo el riesgo de volver a contaminarse.

Por ello, es necesario volver a clorar para cumplir con la normatividad (NOM-127-SSA1-1994) en cuanto a presencia de cloro residual si el agua se emplea para establecimientos urbanos.

Los procedimientos de cloración que se emplean en esta fase son el gas cloro, hipoclorito sódico e hipoclorito cálcico.

Estos post-tratamientos son aplicados de forma básica para producción de agua potable; sin embargo, estos procesos pueden no ser aplicados en casos particulares, es decir, industrias donde se emplea el proceso de ósmosis inversa para producir agua de alta pureza como la industria farmacéutica, alimenticia, industrias que requieren agua para calderas, etc.

Para los **procesos variables en post-tratamiento** se tiene:

El post-tratamiento más aplicado a nivel mundial es la remineralización con NaOH y recientemente está siendo aplicado el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por su alta eficiencia y bajo costo. Sin embargo, también existen otros post-tratamientos denominados recarbonatación el cual emplea como principales reactivos el CaCO_3 , Na_2CO_3 y NaHCO_3 , la unión de remineralización y recarbonatación ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$, $\text{CaSO}_4 + \text{NaHCO}_3$, $\text{CaCl}_2 + \text{NaHCO}_3$) y desgasificación con torre empacada empleada para remover CO_2 y H_2S de agua desalada por procesos de desalación; siendo el costo, la complejidad del proceso y la manipulación de materiales las principales desventajas para estos post-tratamientos.

1.4. **Residuos generados por el proceso de ósmosis inversa**

El subproducto de todos los procesos de desalación es agua altamente concentrada de elementos eliminados durante el proceso, denominado salmuera. Esto incluye sales disueltas, residuos del pretratamiento químico para controlar la formación de sales que puedan precipitar sobre las membranas y evitar el crecimiento biológico.

Uno de los problemas de mayor importancia en el ámbito de la desalación del agua de mar es encontrar opciones ambientalmente sensibles para la evacuación de la salmuera; sugiriendo que el siguiente paso en la evolución y desarrollo de tecnologías de desalación sea reducir la cantidad de salmuera o encontrar la forma de que sea aprovechada (Sherwood Design Engineers, 2006).

Los métodos de disposición de salmuera existentes en la actualidad se describen a continuación:

1.4.1. **Descarga a un cuerpo de agua superficial**

Este método constituye una forma de dilución basada en el volumen de la descarga relativo al del cuerpo de agua receptor (mar o corrientes de agua superficiales). Se puede lograr la evacuación hacia corrientes de aguas superficiales directamente, vertido al mar instalando difusores en el punto de descarga o mezclando la salmuera con otras corrientes menos salinas antes de su descarga final.

Hoy en día, dicho método de evacuación de la salmuera es el más fácil de diseñar y la opción disponible menos costosa para las plantas desaladoras.

1.4.2. Inyección profunda

Se inyecta la salmuera por medio de pozos a sistemas acuíferos confinados de agua no potable o bien, a acuíferos salobres que se encuentran en las costas.

Con la inyección en pozos profundos la salmuera se elimina bajo la superficie y es diluida dentro de un sistema existente. Ese tipo de inyección requiere de un minucioso estudio para asegurar que no contaminen los recursos de agua subterránea existentes o adyacentes y que el sistema de acuíferos tenga la capacidad de soportar la inyección por tiempo indefinido.

1.4.3. Descarga en instalación sanitaria

La descarga de salmuera a las instalaciones existentes de drenaje generalmente no constituye una opción viable, a menos que el sistema de drenaje tenga la capacidad de recibir un gran volumen de carga adicional. Por otra parte, si se descargan grandes cantidades al sistema de drenaje, se puede alterar el esquema de tratamiento de una planta; por lo que, ésta tendría que ser modernizada o sufrir cambios en su operación (Sherwood Design Engineers, 2006).

1.4.4. Aplicación en suelo

La aplicación consiste en la irrigación del concentrado de plantas desaladoras en tierras de cultivo como aprovechamiento de este recurso. La irrigación puede ser ejecutada si existe la necesidad cerca de la planta desaladora y si el contenido de sólidos disueltos es aceptable para el crecimiento de la cosecha.

En aplicaciones a cultivos, el concentrado aplicado a suelos puede afectar al mismo como a los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Por ello, la mezcla con aguas residuales de baja salinidad minimiza el concentrado de sales y es aplicable para irrigación. Este método de disposición no es muy frecuente (Mickley, 2001).

1.4.5. Lagunas de evaporización

La salmuera se distribuye en lagunas someras, donde se evapora gradualmente. Después, los residuos sólidos que se generan por la evaporación son vertidos en un relleno sanitario o se recolectan para ser reutilizados.

Las lagunas constituyen un método ideal para eliminar la salmuera, pero su costo es su principal desventaja ya que requiere grandes extensiones de terreno, además de su estética indeseable. No obstante, las lagunas de evaporización permiten la minimización de los impactos en los ambientes marinos y que los sólidos remanentes sean reutilizados o eliminados adecuadamente en un relleno sanitario.

Dependiendo del contenido en la salmuera, puede ser retornado sin tratamiento o diluido, a su fuente de origen o un cuerpo próximo de agua (por ej. descarga al mar, cuerpo de agua superficial, inyección a un acuífero salino). Estas opciones son las más económicas y fáciles de implementar; particularmente, si la planta desaladora está localizada cerca del mar ya que el bombeo, la construcción de tuberías, operación y mantenimiento de esta infraestructura son de costos significativos (Agriculture, Fisheries and Forestry, 2002).

Todos los métodos mencionados pueden aumentar perceptiblemente el costo del proceso; así el método de disposición de salmuera debe ser uno de los puntos principales investigados en la determinación de la viabilidad de una planta desaladora propuesta (Squire *et al.*, 1996).

Dado el costo de construcción y operación de plantas desaladoras, el agua de salmuera se ve a menudo como activo; cuando está explotada, puede reducir el precio neto de proporcionar agua dulce; mientras que cumple estándares de funcionamiento ambientales (Agriculture, Fisheries and Forestry, 2002).

Actualmente no existe un marco regulatorio que obligue a las empresas a descargar de una forma eficaz la salmuera al mar. Por ello, se tiene que cuidar que la salmuera no se vaya a concentrar y afectar alguna zona; la planta como tal no contamina, el problema es no descargar la salmuera adecuadamente.

Casos particulares de estudio presentan algunos ejemplos que son fuentes de opciones para el uso productivo de salinidad:

Cosecha de sal: la sal y otros minerales pueden ser extraídos por medios mecánicos o cristalización por evaporación siendo, cada vez más, un producto de elevado valor para las aplicaciones agrícola, industrial y doméstica (DRD, 1999).

Sal-proc: proceso solar y mecánico integrado de extracción secuencial de elementos disueltos de aguas salinas inorgánicas. El proceso involucra evaporación múltiple y/o enfriamiento complementado por el mineral y el proceso químico. Minerales valiosos como hidróxido de magnesio, cloruro de calcio, cloruro de sodio pueden ser extraídos por dicho proceso.

1.5. Normatividad para agua potable

En este estudio se consideró tratar el agua de mar para obtener agua para uso y consumo humano; por lo que, la normatividad a aplicar es la NOM-127-SSA1-1994. “Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Los límites permisibles que establece la NOM-127-SSA1-1994 para características físicas y organolépticas se establecen en la tabla 1.9.

Tabla 1. 9. Límites permisibles de características físicas y organolépticas

Característica	Límite permisible
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (NTU) o su equivalente en otro método.

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la tabla 1.10. Los límites se expresan en mg/L.

Tabla 1. 10. Límites permisibles para agua de uso y consumo humano NOM-127-SSA1-1994

Característica	Límite permisible (mg/L)
Sodio	200
Calcio	No existe
Magnesio	No existe
Cloro	Cloruros (Cl ⁻) 250 Cloro residual libre 0.2-1.5
Sulfatos	400
Carbonatos y Bicarbonatos	Dureza total (CaCO ₃) 500
Nitratos	(como N) 10
Hierro*	0.3
Manganeso*	0.15
Sílice	No existe
Flúor	Fluoruros (como F ⁻) 1.5
Bario*	0.7
Estroncio*	No existe
Aluminio*	0.2
N-amoniaco*	0.5
Cobre*	2
Potasio	No existe
Fosfatos*	No existe

* Microcontaminantes (no comunes en agua de mar).

La tabla anterior presenta los constituyentes principales del agua de mar y sus límites máximos permisibles con respecto a la NOM-127-SSA1-1994 para uso y consumo humano.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO PARA PRETRATAMIENTO DE AGUA DE MAR

La metodología empleada para el pretratamiento del agua de mar está dividida en cinco etapas principalmente: 1) muestreo y caracterización de agua de mar, 2) preselección de dos tipos de pretratamiento y el post-tratamiento del proceso de ósmosis inversa para la desalación de agua de mar, 3) realización de pruebas de laboratorio para la determinación de los mejores reactivos y sus dosis a utilizar en las etapas de los dos pretratamientos y el post-tratamiento del proceso de ósmosis inversa en planta piloto, 4) realización de pruebas de pretratamiento en una planta piloto de desalación por ósmosis inversa como proceso principal y 5) determinación del pretratamiento más económico de los dos determinados con base en una estimación de costos de reactivos y materiales. A continuación se describen cada una de las cinco etapas de la metodología empleada en este estudio.

2.1. Agua de mar

Los materiales y reactivos empleados para las pruebas de pretratamiento y post-tratamiento de agua de mar se describen a continuación:

2.1.1. Muestreo y caracterización de agua de mar

Se realizaron tres muestreos (septiembre de 2008, febrero y abril de 2009) de agua de mar en el Océano Pacífico (playa Condesa, Acapulco Gro.) para la determinación de la calidad del agua a utilizar para las pruebas en laboratorio en este estudio y uno (noviembre de 2009) para la realización de pruebas en planta piloto. Se seleccionó esta agua de mar, con fines ilustrativos, por su cercanía respecto a la ciudad de México que fue el lugar donde se realizaron la mayoría de las pruebas de tratamiento.

La caracterización del agua de mar cruda se realizó en el Instituto de Ingeniería, UNAM (septiembre 2008, febrero 2009, noviembre 2009) e *in situ* (abril 2009). Los parámetros determinados fueron los siguientes: pH, conductividad eléctrica, color, turbiedad, temperatura e índice de densidad de ensuciamiento (IDE).

2.1.2. Preselección de dos tipos de pretratamiento y el post-tratamiento del proceso de ósmosis inversa para la desalación de agua de mar

Se realizó una extensa y minuciosa búsqueda bibliográfica con la finalidad de determinar los pretratamientos más comúnmente instalados en plantas de desalación a nivel mundial. Se recopilaron alrededor de 50 reportes técnicos referentes a tratamientos (pre y post-tratamientos) de agua de mar para desalación por OI. Estos documentos se analizaron y resumieron obteniendo que está reportada la aplicación de siete diferentes pretratamientos y dos post-tratamientos a nivel de planta industrial y piloto. También se determinó que existen reportados diferentes reactivos para esos pre y post-tratamientos del proceso de ósmosis inversa. Entre los reactivos más importantes están el hipoclorito de sodio (cloración), ácido sulfúrico (ajuste de pH), cloruro férrico (coagulación), bisulfito de sodio (decoloración), hidróxido de sodio (ajuste de pH), entre otros. Con base en una gran parte de la información recopilada, en la tabla 2.1 se presenta el resumen de los diferentes tipos de pretratamientos aplicados al agua de mar.

Tabla 2. 1. Pretratamientos aplicados a la ósmosis inversa para la desalación del agua de mar y su eficiencia para la remoción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

PRETRATAMIENTOS							
	Convencional	C+MF+UF	C+FAD	C+FAD+UF	C+UF	Ablandamiento+UF	UF
Nivel de estudio	11P, 7PL	P	P	P	P	PL	P
Reportes técnicos = 34	18	1	1	2	1	1	10
Físicos							
Temperatura	-	-	-	-	-	-	-
pH	-	-	-	-	-	-	-
Químicos							
SDT	1	2	1	2	2	-	1.5
Conductividad	1	2	1	2	2	-	1.5
COD	1.5	2	1.5	2.5	2	-	1
COT	2	3	2	2.5	1	-	1.5
Fe	3	3	3	2.5	3	-	-
Total por grupo	1.7	2.4	1.7	2.3	2		1.37
Microbiológicos							
Clorofila-a	2.5	3	2.5	3	3	-	3
Coliformes totales	2.5	3	2.5	3	3	-	2
Fitoplancton	2.5	3	3	3	3	-	3
Total por grupo	2.5	3	2.67	3	3		2.5
Mixtos							
IDE	2.5	3	3	3	3	-	3
Turbiedad	2.5	3	3	3	3	3	3
Total por grupo	2.5	3	3	3	3	3	3
Total	6.7	8.4	7.37	8.3	8	----	6.87

Nota: 0-No funciona, 1-Funciona poco, 2-Funciona bien, 3-Funciona muy bien, P: Piloto, PL: Planta

- En los espacios con color azul no se consideró calificación porque no se tenían datos.

- El color verde indica las calificaciones individuales asignadas y el color amarillo las calificaciones finales o totales.

C = Convencional; MF = Microfiltración; UF = Ultrafiltración; FAD = Flotación con aire disuelto; SDT = Sólidos disueltos totales; COD = Carbono orgánico disuelto; COT = Carbono orgánico total

IDE = Índice de densidad de ensuciamiento.

La tabla 2.1 se realizó dividiendo en siete grupos los pretratamientos siendo los siguientes:

- Convencional: el pretratamiento convencional involucra tres diferentes tipos:
 - a) coagulación + floculación + filtración dual y cartucho (más aplicado a nivel mundial),
 - b) coagulación + filtración dual y cartucho,
 - c) floculación + filtración dual y cartucho.
- Convencional (coagulación + floculación + filtración dual) + microfiltración + ultrafiltración
- Convencional (coagulación + floculación) + flotación con aire disuelto (FAD)
- Convencional (coagulación + floculación) + flotación con aire disuelto + ultrafiltración
- Convencional (coagulación + floculación + filtración dual) + ultrafiltración
- Ablandamiento + ultrafiltración
- Ultrafiltración.

Los parámetros fueron divididos en cuatro grupos (físicos, químicos, microbiológicos y mixtos); con base en resultados reportados sobre la remoción de estos parámetros para cada grupo de pretratamiento se le asignaron las siguientes calificaciones:

Calificación 0 = No funciona (0-10% remoción)

Calificación 1 = Funciona poco (10-40% remoción)

Calificación 2 = Funciona bien (40-70% remoción)

Calificación 3 = Funciona muy bien (70-100% remoción)

Posteriormente, se sumaron y dividieron las calificaciones parciales entre el número de parámetros, obteniendo la calificación por grupo de parámetros y finalmente se sumaron las calificaciones de cada grupo para obtener la calificación final por pretratamiento.

Con base en un análisis de los pretratamientos aplicados al agua de mar a nivel mundial, se determinó que:

- El 53% de los pretratamientos utilizados para agua de mar son de tipo convencional (coagulación-floculación-filtración, filtración directa, coagulación-filtración) siendo el más aplicado a nivel mundial coagulación-floculación-filtración para el pretratamiento de agua de mar.
- Aunque los procesos de microfiltración y/o ultrafiltración obtuvieron las mejores calificaciones; no son procesos ampliamente aplicados para pretratamientos de agua de mar debido a que son procesos con elevado costo. Además, no se tuvo la suficiente información para calificar todos los parámetros, por lo que se tuvieron que proponer algunos valores para obtener la calificación final.

- Debido a lo anterior, se determinó que el pretratamiento convencional coagulación-floculación-filtración y filtración directa, son eficientes, de mayor aplicación a nivel mundial y son procesos económicamente viables.

2.1.3. Pruebas de laboratorio para la determinación de los reactivos y sus dosis a utilizar en las etapas de los dos pretratamientos y el post-tratamiento del proceso de ósmosis inversa en planta piloto

Antes de realizar las pruebas en laboratorio, para la determinación de los mejores reactivos y dosis de las etapas de los dos pretratamientos y el post-tratamiento del proceso de OI en planta piloto, se hizo una selección de los reactivos e intervalos de dosis de éstos. Es importante mencionar que se realizaron pruebas con agua de mar colectada en época no vacacional (febrero de 2009) y época vacacional (abril de 2009)

Uno de los pretratamientos preseleccionados en este estudio está integrado por los procesos principales de coagulación-floculación-filtración dual, el cual consta de varias etapas: ajuste de pH a agua cruda, precloración, coagulación-floculación, filtración dual y cartucho, decloración. Para determinar los mejores reactivos y dosis de cada etapa de pretratamiento se realizaron una serie de pruebas en laboratorio que se describen a continuación:

En primer lugar se seleccionaron, con base en un análisis de la información reportada, los reactivos y los intervalos de dosis aplicadas en plantas de desalación por OI a nivel mundial. La tabla 2.2 presenta los reactivos y el intervalo de dosis de éstos y el anexo F desglosa con más detalles esa información.

Tabla 2. 2. Promedio de dosis aplicadas e intervalos de los reactivos aplicados en las etapas del pretratamiento integrado por los procesos de coagulación-floculación y filtración dual para desalación de agua de mar por OI.

	Precloración (NaOCl)	Ajuste pH (H₂SO₄)	Coagulación (FeCl₃)	Coad-yuvante	Decloración (NaHSO₃)	Anti-incrustante
Valores de dosis reportados	Valor alto: 5 mg/L Valor bajo: 0.3 mg/L Valor medio: 2.65 mg/L	alto: 170 mg/L bajo: 25 mg/L Valor medio: 97.5 mg/L	alto: 5.2 mg/L bajo: 2 mg/L Valor medio: 3.6 mg/L	alto:1.4 mg/L bajo:0.2 mg/L Valor medio: 0.8 mg/L	alto:15.2 mg/L bajo:1.8 mg/L Valor medio: 8.5 mg/L	alto: 3.86 mg/L bajo:1.05 mg/L Valor medio: 2.45 mg/L
Valor de dosis más utilizado	3 mg/L	Diferentes	3 mg/L	Diferentes	3 mg/L	Diferentes
Intervalos de trabajo propuestos	3-5 mg/L	Para ajustar a pH=6.5 (25-80 mg/L)	3-5 mg/L	0.2-1.5 mg/L	1-3 mg/L	1-3 mg/L

La tabla 2.2 presenta los reactivos más aplicados en las diferentes etapas del pretratamiento a nivel mundial, con base en un análisis de los datos de esta tabla se definieron los intervalos de dosis con la finalidad de proponerlos para las pruebas en laboratorio en este estudio.

Cabe destacar que, la dosis de reactivos para cada etapa antes mencionada, dependerá de la calidad del agua en estudio; por ello, no necesariamente tendrá que encontrarse en el intervalo propuesto para cada etapa.

Con el agua de mar colectada en febrero de 2009 se realizaron pruebas en laboratorio para la determinación de la mejor dosis por etapa y en el caso de la etapa de ajuste de pH al agua de mar cruda y coagulación también del mejor reactivo para la operación de la planta piloto de desalación por OI. A continuación se describe la técnica experimental aplicada para esas pruebas de cada una de las etapas del pretratamiento.

2.1.3.1. Ajuste de pH al agua de mar cruda

Para las pruebas de ajuste de pH al agua de mar cruda se compararon el ácido sulfúrico (H_2SO_4), que ha sido aplicado en la mayoría de los pretratamientos a nivel mundial para ajuste de pH y el ácido clorhídrico (HCl). Los reactivos ácido sulfúrico (H_2SO_4 marca Baker al 97.7%) y ácido clorhídrico (HCl marca J. T. Baker al 36.5-38%) fueron empleados para la etapa de ajuste de pH a agua cruda de mar en pretratamiento, preparándose una solución a una concentración de 0.1N para cada ácido.

Se realizó una curva de neutralización (volumen de ácido vs pH) para cada ácido. El procedimiento para la etapa de ajuste de pH a agua cruda se describe a continuación:

- Se colocan 100 mL de agua de mar cruda en un vaso de precipitado
- Se mide el pH inicial del agua en estudio
- Se dosifica 0.1 mL de la solución de ácido, se agita el agua y se determina el pH; este paso se realiza varias veces para obtener los datos suficientes para realizar la curva de neutralización.

2.1.3.2. Precloración

El reactivo hipoclorito de sodio (NaOCl comercial marca Cloralex^{MR} con concentración de cloro libre de 5.3%) fue empleado para la precloración del agua de mar en el pretratamiento preparando una solución con una concentración de 1,000 mg/L. El procedimiento de la etapa de precloración se describe a continuación:

- Se colocan 500 mL de agua de mar cruda con etapa de ajuste de pH en 6 jarras de 1L
- Se agrega la dosis de cloro en un intervalo de 0-10 mg/L en jarras
- Se agita el agua
- Se determina el cloro residual en cada jarra.

Cabe señalar que, se realizó el mismo procedimiento a un intervalo de dosis de cloro menor (1-3.5 mg/L) ya que en este intervalo se encuentra la mejor dosis y se realizaron las gráficas ($[Cl_2]_{inicial}$ vs $[Cl_2]_{residual}$) correspondientes para esta etapa.

2.1.3.3. Coagulación-floculación

Los reactivos sulfato de aluminio libre de hierro ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ líquido marca SIDESA al 7.5%), cloruro férrico (FeCl_3 líquido PIX-111 marca Kemira de México al 39%) y policloruro de aluminio (PAX-29 líquido ($\text{Al}_2(\text{OH})_x\text{Cl}_{6-x}$ $0 < x < 6$ al 23%) marca Kemira de México) fueron empleados para pruebas de coagulación al agua de mar preparando una solución a una concentración de 1,000 mg/L para cada coagulante.

Para las pruebas de coagulación-floculación a nivel laboratorio se describe a continuación la técnica utilizada; cabe señalar que, dentro de estas pruebas también se integraron las pruebas para las otras etapas del pretratamiento (ajuste de pH al agua cruda, precloración y decloración) con la finalidad de simular todas las etapas del pretratamiento a nivel laboratorio. Por ello, la descripción de esta técnica contiene todas las etapas del pretratamiento:

- Se agrega 1 L de agua de mar cruda con etapa de ajuste de pH y precloración a seis vasos de precipitado de 1 L
- Se dosifica el coagulante en un intervalo de (0-10 mg/L) y se agita rápidamente a 100 RPM durante 1 minuto
- Se realiza la floculación a 30 RPM por 30 minutos
- Se agrega la dosis de bisulfito de sodio necesaria para eliminar el cloro residual
- Se deja sedimentar por 30 minutos.

Con base en los resultados obtenidos aplicando el intervalo de dosis de coagulante de 0-10 mg/L, se encontró que en el intervalo de dosis de coagulante 1-6 mg/L se obtuvieron los mejores resultados para remoción de turbiedad y color de agua de mar cruda para los tres coagulantes en estudio. Con base en un análisis de resultados se obtuvo el mejor coagulante, la mejor dosis de coagulante y la mejor dosis de cloro aplicando la etapa de coagulación-floculación a nivel laboratorio.

2.1.3.4. Decloración

El reactivo bisulfito de sodio granular (NaHSO_3 marca J. T. Baker al 67.1%) fue empleado en la etapa de decloración del pretratamiento de agua de mar cruda, preparando una solución a una concentración de 3,000 mg/L. para esta etapa, se realizó el procedimiento para coagulación-floculación y antes de finalizar la etapa de floculación se agregó la dosis necesaria para eliminar el cloro residual en agua pretratada.

Con el agua de mar de período vacacional (abril 2009) se realizaron las mismas pruebas de pretratamiento *in situ* para la determinación de la mejor dosis a aplicar en la planta piloto.

La determinación de los reactivos y dosis a aplicar en los procesos del post-tratamiento a efluente del proceso de OI a nivel laboratorio se describe a continuación:

2.1.3.5. Ajuste de pH al agua producto o permeado

El proceso de remineralización (ajuste de pH al agua de permeado) fue aplicado en esta etapa del post-tratamiento; se seleccionaron dos reactivos con base en una comparación de información reportada sobre los reactivos y dosis aplicadas en plantas de desalación de OI,

siendo el hidróxido de sodio (NaOH) el más aplicado a nivel mundial; se propuso la aplicación de otro reactivo el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) con la finalidad de seleccionar el mejor reactivo, con base en la calidad de agua tratada y costo del mismo.

El reactivo hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ marca J. T. Baker al 100 %) y el reactivo hidróxido de sodio (NaOH marca J. T. Baker al 98.4 %) fueron empleados para pruebas de post-tratamiento a nivel laboratorio preparando una solución a una concentración de 250 mg/L para cada reactivo.

Se realizó una curva de neutralización (volumen de base vs pH) para cada reactivo. El procedimiento aplicado para esta etapa es el mismo aplicado para ajuste de pH al agua de mar cruda.

2.1.3.6. Post-cloración

Para la etapa de post-cloración se utilizó el hipoclorito de sodio (NaOCl). El reactivo hipoclorito de sodio (NaOCl comercial marca Cloralex^{MR} con concentración de cloro libre de 5.3%) fue empleado para las pruebas del agua tratada realizadas en laboratorio preparando una solución con una concentración de 1,000 mg/L.

Es importante mencionar que el agua producto o permeado se encuentra libre de cloro, por lo cual, para estas pruebas se dosificó 0.5 mg Cl_2 /L con la finalidad de prevenir posterior contaminación debido al transporte en tuberías o su almacenamiento. Dicha dosis es recomendada como promedio en reportes técnicos para agua de uso y consumo humano y ésta se encuentra dentro del intervalo establecido para cloro residual en agua potable en la NOM-127-SSA1-1994.

2.1.4. Pruebas de pretratamiento en una planta piloto de desalación por ósmosis inversa como proceso principal

2.1.4.1. Diseño de una planta piloto de desalación por ósmosis inversa

Desde que se preseleccionaron los dos pretratamientos evaluados en actividades anteriores en este estudio, se procedió con el diseño de tuberías, equipos y accesorios de las etapas de los pretratamientos para operación de la planta piloto de desalación de agua de mar.

La planta piloto está compuesta por dos pretratamientos convencionales (a operar de manera opcional) como coagulación-floculación-filtración o filtración directa y por un sistema de OI. El diseño se basó en una comparación de información reportada sobre los reactivos y dosis aplicadas en plantas de desalación de OI a nivel mundial y las dosis propuestas para emplear en este estudio (tabla F1 en anexo F y tabla 2.2).

Inicialmente se diseñaron los trenes de tratamiento de la planta piloto de OI como se presenta en las figuras 2.1 y 2.2 como diagrama de flujo de proceso y el isométrico de la planta piloto de OI respectivamente, para los pretratamientos preseleccionados.

La planta piloto cuenta con un tercer pretratamiento en línea, siendo también **Filtración directa hacia filtros cartuchos**, la aplicación de cualquier pretratamiento mencionado dependerá principalmente de la calidad del agua a tratar; por ello, el diseño de la planta la hace flexible a diferentes tipos de pretratamiento para diferentes calidades de agua con la finalidad de obtener un influente para OI con la calidad requerida, aumentando la vida media útil de las membranas.

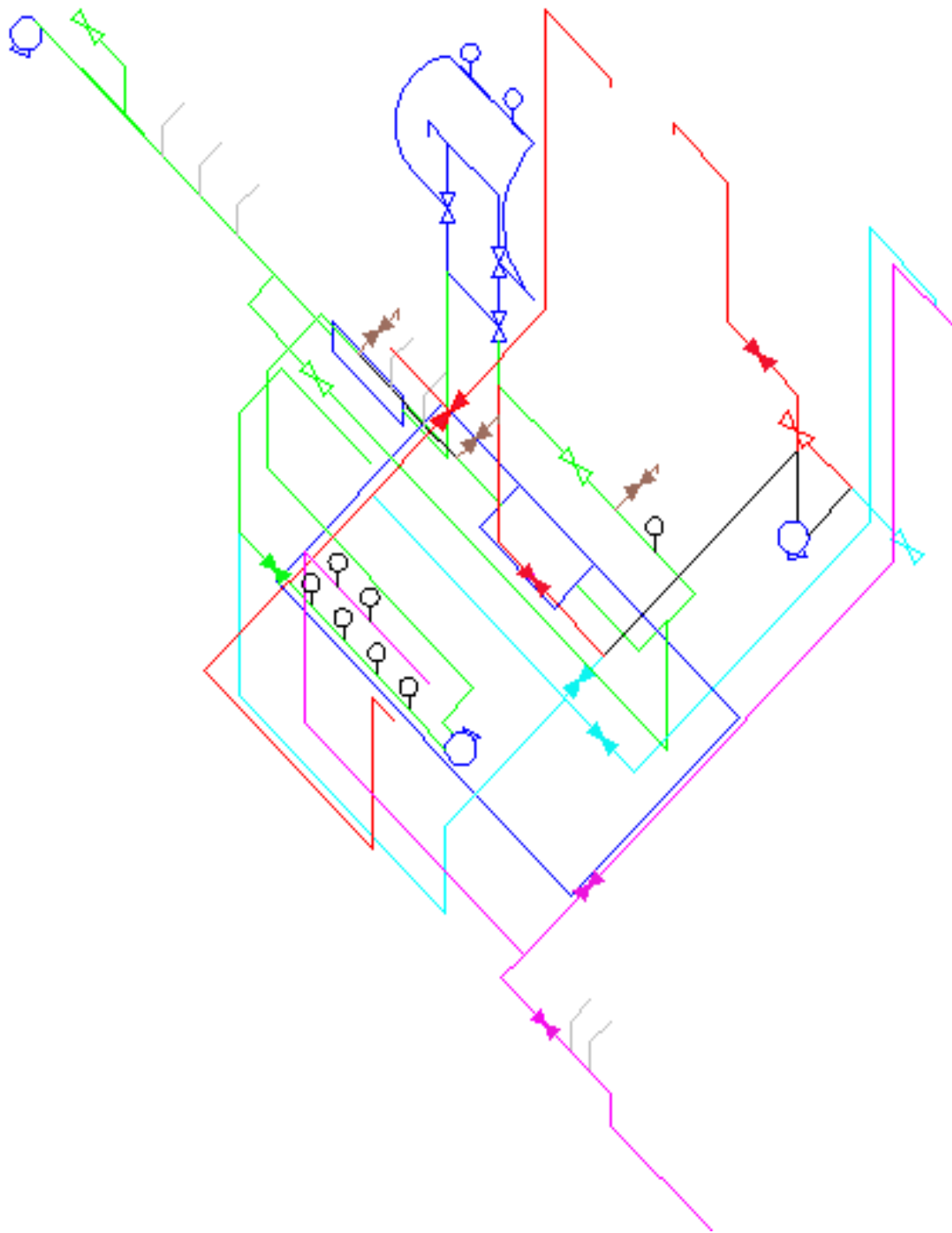


Figura 2. 2. Isométrico del piloto de desalación de agua de mar compuesto por los pretratamientos convencionales coagulación-floculación-filtración y filtración directa con un sistema de ósmosis inversa.

2.1.4.2. Instalación de una planta piloto de desalación por ósmosis inversa

Con lo que respecta a la **instalación** de la planta piloto de OI, al inicio se contaba con la planta desaladora que contiene la bomba de alimentación de agua de mar (BC-01), la bomba de alta presión (BAP-01), filtros cartucho de 20 y 10 micras (FC-01), membranas de OI (OI-01) y un filtro a presión (FD-01) como se muestra en la foto 2.1.



Foto 2. 1. Equipo de OI y filtro a presión.

Posteriormente, se procedió a la instalación hidráulica del tren de tratamiento de la planta piloto de OI. Iniciando por la fabricación de la cuerda a los tubos de PVC (foto 2.2).



Foto 2. 2. Fabricación de cuerda a tubos de PVC.

Se realizó la instalación hidráulica de las etapas y equipos involucrados en el tren de tratamiento de la planta piloto de OI; la foto 2.3 presenta el armado hidráulico de la bomba de alimentación de agua de mar (BC-01) al filtro a presión (FD-01), conteniendo los puertos de dosificación de reactivos y el mezclador estático (ME-01) en línea.



Foto 2. 3. Instalación hidráulica de bomba de alimentación a filtro a presión.

Se realizó la instalación hidráulica del filtro a presión (FD-01) a filtros cartucho (FC-01) conteniendo un puerto de muestreo y un puerto para medidor de temperatura (foto 2.4)



Foto 2. 4. Instalación hidráulica del filtro a presión a filtros cartucho.

Continuando con la instalación hidráulica, se fabricó de los filtros cartucho (FC-01) a la bomba de alta presión (BAP-01) conteniendo dos puertos de muestreo y dos puertos para dosificación de reactivos como se presenta en la foto 2.5.



Foto 2. 5. Instalación hidráulica de filtros cartucho a bomba de alta presión.

Posteriormente, se realizó la instalación hidráulica de la bomba de alta presión (BAP-01) a la alimentación de las membranas de OI (OI-01) conteniendo cuatro puertos para medición de parámetros de calidad de agua como se muestra en la foto 2.6.



Foto 2. 6. Instalación hidráulica de bomba de alta presión a membranas de OI.

Se realizó la instalación hidráulica de los sistemas de retrolavado de filtro y lavado de membranas de OI, como se muestra en la foto 2.7.



Foto 2. 7. Instalación de sistemas de retrolavado de filtro y lavado de membranas de OI.

Finalmente, la foto 2.8 presenta la instalación hidráulica completa de la planta piloto de OI con sus respectivos sistemas de retrolavado de filtro y lavado de membranas de OI.



Foto 2. 8. Instalación hidráulica de la planta piloto de OI.

2.1.4.3. Realización de pruebas de pretratamiento en una planta piloto de desalación por ósmosis inversa como proceso principal

Para las pruebas de pretratamiento en planta piloto se utilizó un agua de mar sintética (noviembre 2009) simulando el agua de mar del período vacacional; se realizaron las pruebas experimentales aplicando las condiciones óptimas obtenidas en laboratorio y se realizó la caracterización del agua de mar cruda y pretratada.

Para la preparación del agua de mar sintética se utilizó material sal natural de mar marca La Bahía, fue empleada para preparación de agua de mar sintética a una concentración de 35,000 mg/L. El procedimiento para la preparación de dicha agua se describe en el anexo G.

Es importante mencionar que la planta piloto de ósmosis inversa se operó a una presión constante de alimentación de agua cruda a membranas de 500 psi y un flujo promedio de alimentación de agua cruda de 0.269 L/s.

La planta piloto cuenta con un filtro a presión que contiene los siguientes materiales: a) el material gravilla (2-4 mm de tamaño de grano), b) el material arena marca SOUTHERN FILTER MEDIA (0.4-0.8 mm tamaño medio) y, c) el material antracita (0.8-1.6 mm tamaño medio) dichos materiales fueron empleados para la filtración de agua de mar.

Para la filtración por cartucho se emplearon cartuchos marcas R-Can 20 micras (4.5" diámetro x 10" longitud) y FLOW-PRO 10 micras (4.5" diámetro x 10" longitud).

Cabe destacar que, los reactivos empleados para las pruebas en planta piloto fueron sustituidos a grado industrial con excepción del NaOCl debido a la cantidad que se emplea en planta piloto.

2.1.4.3.1. Ajuste de pH al agua de mar cruda

El reactivo ácido sulfúrico (H_2SO_4 grado técnico marca CIVEQ al 90-92%) fue empleado para la etapa de ajuste de pH al agua de mar sintética en pretratamiento a nivel planta piloto, preparándose una solución a una concentración de 0.1N.

2.1.4.3.2. Precloración

El reactivo hipoclorito de sodio (NaOCl comercial marca Cloralex^{MR} con concentración de cloro libre de 5.3%) fue empleado para la precloración del agua de mar sintética en el pretratamiento a nivel planta piloto preparando una solución con una concentración de 1,000 mg/L.

El reactivo para determinación de cloro residual marca HACH fue empleado para determinar cloro residual en agua pretratada.

2.1.4.3.3. Coagulación-floculación

El reactivo sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$ marca J. T. Baker al 100%) fue empleado para pruebas de coagulación al agua de mar sintética en el pretratamiento a nivel planta piloto preparando una solución a una concentración de 1,000 mg/L.

Cabe destacar que, se realizaron las pruebas en planta piloto a un intervalo de dosis de coagulante (1-9.5 mg/L) ya que en este intervalo se encuentra la mejor dosis basado en el parámetro IDE a agua pretratada.

2.1.4.3.4. *Decloración*

El reactivo bisulfito de sodio (NaHSO_3 marca CIVEQ al 58.5 %) fue empleado para la decloración en el pretratamiento del agua de mar sintética en planta piloto preparando una solución a una concentración de 3,000 mg/L.

La técnica empleada para las pruebas en planta piloto de ósmosis inversa se describe a continuación:

- Se alimenta al sistema el agua de mar sintética mediante una bomba
- Se aplica en línea la etapa de ajuste de pH al agua en estudio (dosis óptima de H_2SO_4)
- Se aplica en línea la etapa de precloración al agua en estudio (dosis óptima de NaOCl)
- Se aplica en línea la etapa de coagulación-floculación al agua en estudio (dosis óptima del mejor coagulante)
- Se realiza la etapa de filtración (filtración dual y cartucho) al agua pretratada
- Se aplica en línea la etapa de decloración al agua pretratada (dosis óptima de NaHSO_3)
- Se determina el valor de IDE en línea para agua pretratada
- El agua pretratada pasa a una bomba de alta presión que opera a una presión mínima de alimentación de agua de 22 psi
- El agua es alimentada por la bomba de alta presión a membranas de OI a una presión constante de 500 psi
- Se aplica en línea de permeado la etapa de ajuste de pH al agua producto o permeado (dosis óptima de $\text{Ca}(\text{OH})_2$)
- Se aplica en línea de permeado la etapa de post-cloración al agua producto o permeado (dosis óptima de NaOCl).

Para las pruebas en planta piloto con pretratamiento filtración directa se realiza el mismo procedimiento omitiendo la dosificación del coagulante.

Cabe señalar que, se monitorearon diferentes parámetros a través de la operación de la planta piloto como son: a) IDE al agua de mar sintética, b) presión de entrada y salida de filtro dual, c) presión de salida de filtros cartucho que es la presión de entrada a la bomba de alta presión, d) caudal de alimentación a la planta piloto, e) caudal de permeado y rechazo de planta piloto, f) cloro residual antes de etapa de decloración y, g) caracterización del agua cruda y agua tratada (pH, color, turbiedad, conductividad eléctrica, temperatura).

2.1.4.4. Técnicas analíticas y experimentales

Las técnicas analíticas y experimentales empleadas al agua de mar para los pretratamientos aplicados en este estudio se describen a continuación:

2.1.4.4.1. Técnicas analíticas

➤ Índice de Densidad de Ensuciamiento (IDE)

Para la caracterización del agua de mar fue implementada la técnica analítica *Silt Density Index (SDI)*; *ASTM Standard D4189, the American Standard for Testing Material*. Esta prueba se realizó a una muestra de agua de mar en estudio para determinar el grado de pretratamiento a aplicar para operar el proceso de ósmosis inversa para desalación. El valor del IDE es calculado a partir de la tasa de taponamiento del filtro, el cálculo se describe en el anexo H.

El valor del IDE varía con el fabricante del filtro membrana, por lo que los valores de IDE obtenidos con diferentes fabricantes de filtros no pueden ser comparables.

Para la determinación del Índice de Densidad de Ensuciamiento (IDE) al agua de mar en estudio, el material empleado fueron filtros MILLIPORE 0.45 μm , 47 mm diámetro y un dispositivo para la determinación del IDE.

El sistema para determinar IDE al agua de mar cruda está constituido por una bomba marca BALDOR ($3/4$ HP, 230 V), una recirculación instalada a la salida de la descarga de agua con una válvula de $1/2$ " diámetro y un dispositivo para determinación del IDE que consta de una válvula $1/4$ " de diámetro, un manómetro y un contenedor para filtro. La foto 2.9 muestra el sistema empleado para aplicación de la prueba de IDE al agua cruda de mar.



Foto 2. 9. Sistema para determinación de prueba del IDE.

A continuación se describe la técnica utilizada para las pruebas de determinación del IDE al agua de mar cruda en laboratorio:

- Se monta el sistema que consta principalmente de una bomba, una recirculación y un dispositivo para determinación del IDE (válvula, manómetro y contenedor para colocar el filtro) y se establece una presión de operación constante de 207 kPa (30 psi)
- Antes de colocar el filtro membrana se hace pasar agua con la que se realizará la prueba a través del dispositivo para remover contaminantes presentes. Se requiere de una bomba que aumente y suministre una presión de alimentación mayor a 276 kPa (>40 psi)
- Se determina la temperatura del agua en estudio
- Se coloca el filtro membrana en el contenedor (con el lado más claro hacia arriba), manejar el filtro membrana solo con pinzas, evitando tocarlo con los dedos
- Asegurarse que el sello O-ring del contenedor esté en buenas condiciones y colocado apropiadamente, volver a colocar la parte superior del contenedor del filtro y cerrar sin apretar
- Se purga el aire atrapado mediante la válvula; se cierra la válvula y se aprieta el contenedor del filtro
- Abrir la válvula y simultáneamente usar un cronometro, medir el tiempo requerido para un flujo de 500 mL. Registrar el tiempo (t_i) y dejar la válvula abierta para que continúe el flujo
- Medir y registrar los tiempos para coleccionar volúmenes adicionales de 500 mL de muestra, comenzando a recolectar a 5, 10 y 15 min (tiempo final, t_f) del tiempo total (T) transcurrido de flujo. Medir la temperatura del agua y verificar la presión en cada muestra.

➤ pH

Para la determinación del pH fue aplicado el método estandarizado **APHA 4500H+B, Electrometric Standard Methods**. Empleando un equipo Multiparámetro Orión 4 Star.

➤ Color

Para la determinación del color fue aplicada la técnica estandarizada **Method 8025 HACH Company. Color, true and Apparent**. Empleando un equipo Espectrofotómetro HachTM modelo DR 5000.

➤ Turbiedad

Para la determinación de la turbiedad fue implementado el método estandarizado **APHA 2130B Nefelometric Standard Methods**. Empleando un equipo Turbidímetro MerckTM modelo Turbiquant 1000 IR.

➤ Conductividad Eléctrica

Para la determinación de la conductividad eléctrica fue implementado el método estandarizado **APHA 2510B, Conductimetric Standard Methods**. Empleando un equipo Multiparámetro Orión 4 Star.

➤ Cloro Residual

Para la determinación del cloro libre fue implementada la técnica **Method DPD 10069 HACH Company. Chlorine, Free**. Espectrofotómetro HachTM modelo DR 5000.

2.1.4.4.2. Técnicas experimentales

➤ Coagulación-floculación

Para la determinación del reactivo y dosis del proceso coagulación-floculación del pretratamiento preseleccionado coagulación-floculación-filtración se aplicó la técnica estandarizada *ASTM D2035-80 (Standard practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water)*, empleando un equipo de jarras PHIPPS & BIRD PB-700 JARTESTER. La foto 2.10 presenta el sistema para prueba de jarras.



Foto 2. 10. Sistema para prueba de jarras a nivel laboratorio

2.1.5. Determinación del pretratamiento más económico de los dos determinados con base en una estimación de costos de reactivos y materiales

Para la realización de la estimación de costos para los dos tipos de pretratamientos y un post-tratamiento aplicados en planta piloto de desalación por OI, se emplearon los costos mencionados en la tabla 2.3 para todos los reactivos e insumos empleados en este estudio.

Tabla 2. 3. Costos de reactivos e insumos para la estimación de costos de pretratamientos aplicados en planta piloto de desalación por OI

Reactivo o insumo	Marca	Pureza (%)	Costo (pesos)
H ₂ SO ₄	CIVEQ	90-92	36.8/L
NaOCl	Cloralex	5.3	6.4/L
Al ₂ (SO ₄) ₃	SIDESA	7.5	1.95/kg
NaHSO ₃	CIVEQ	58.5	67.2/kg
Ca(OH) ₂	Peña	98	2.6/kg
Filtros cartucho	R-Can	----	210/pz
Energía eléctrica	CFE	----	1.3/KW

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Muestreo y caracterización de agua de mar

La tabla 3.1 presenta de manera comparativa los resultados de la caracterización del agua en estudio en los diferentes períodos de muestreo con respecto a la caracterización del agua de mar reportada en literatura en diferentes partes del mundo.

Tabla 3. 1. Caracterización de agua de mar comparada con lo reportado a nivel mundial

	pH	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)
Agua en estudio (septiembre 2008) (3*)	8.14±0.05	51±0.06	18±1.53	2.74±0.23
Agua en estudio (febrero 2009) (6*)	8.17±0.09	50.6±0.24	4±1.67	1.63±0.24
Agua en estudio (abril 2009) (7*)	8.09±0.09	---	35±17.3	6.95±2.97
Agua en estudio (noviembre 2009) (16*)	6.7±0.22	39.7±1.98	87±16.3	7.8±1.45
Leparc <i>et al.</i> , 2007 (Gibraltar)	8.07	49.6	NR	1.6
Abdessemed <i>et al.</i> , 2008 (Mar Mediterráneo)	8.4	55	NR	8.4
Fritzmann <i>et al.</i> , 2007 (Islas Canarias)	6.33	46.2	NR	NR
Petry <i>et al.</i> , 2007 (Chile)	7.4	52	NR	0.1-2
Zhang <i>et al.</i> , 2006 (China)	8.17	48.7	NR	295
Bonnelye <i>et al.</i> , 2004 (Golfo de Omán, Océano Indico)	8.13	55.3	NR	0.22
Brehant <i>et al.</i> , 2002 (Gibraltar)	8.1	48.7	<2.5	0.7

(*) Número de muestras que se promediaron para obtener cada resultado.

La tabla anterior presenta de manera general que los valores de las características del agua colectada y analizada en diferentes períodos en este estudio fueron muy similares a los datos reportados para otros tipos de agua de mar en el mundo; no siendo muy reportado el color en literatura.

La comparación de la caracterización entre los muestreos de este estudio difiere debido a que la caracterización de los muestreos de septiembre de 2008 y febrero de 2009 fueron realizados en período no vacacional y la caracterización del muestreo de abril de 2009 fue realizado en período vacacional; por lo anterior, se puede decir que el agua en período vacacional se encuentra más contaminada y esto se refleja en la comparación de los parámetros color y turbiedad de dichas caracterizaciones.

Cabe señalar que para las pruebas en planta piloto, se utilizó un agua de mar sintética (noviembre 2009) simulando el agua de mar del período vacacional (abril 2009) principalmente en los parámetros de turbiedad y color; para el agua de mar (abril 2009) el parámetro turbiedad se determinó en el intervalo de 2.5-10.5 NTU y el parámetro color se determinó en el intervalo

10-60 U Pt-Co. Por lo anterior, el agua de mar sintética se encuentra dentro de los intervalos de dichos parámetros.

Se determinó el Índice de Densidad de Ensuciamiento (IDE) al agua de mar en estudio. La tabla 3.2 presenta algunas recomendaciones de proveedores de membranas para valores de IDE en ósmosis inversa (Lenntech, 1998).

Tabla 3. 2. Recomendaciones para valores de IDE₁₅ de agua a tratar por OI (Lenntech, 2008)

IDE<1	Varios años en operación sin contaminación coloidal
IDE<3	Varios meses para aplicación de limpieza
IDE 3-5	Contaminación por partículas, es un problema común, frecuente limpieza
IDE>5	Inaceptable, es necesario instalar un tren de pretratamiento

La tabla 3.3 presenta los resultados obtenidos para pruebas de IDE al agua cruda de mar en los cuatro períodos de muestreo.

Tabla 3. 3. Valores promedio de IDE del agua de mar cruda en estudio en diferentes períodos de muestreo

Muestreo	IDE ₅ (%/min)	IDE ₁₅ (%/min)
septiembre 2008	8.02	4.55
febrero 2009	10.6	4.40
abril 2009	17.67	---
noviembre 2009	17.44	6.19

Por una parte, los resultados muestran que los valores de IDE₁₅ obtenidos en los muestreos realizados en el período no vacacional (septiembre de 2008 y febrero de 2009) se encuentran en el intervalo de 3-5 (tabla 3.2). De acuerdo a las recomendaciones de la tabla 3.2, estos valores de IDE₁₅ permitirían tratar el agua de mar por el proceso de OI sin ningún pretratamiento, presenta también un problema común de contaminación de partículas que obligaría a realizar lavados frecuentes de las membranas (Lenntech, 2008).

El resultado del IDE₁₅ obtenido para el muestreo en período vacacional (abril de 2009) fue muy alto, a tal grado que sólo se pudo medir el valor de IDE₅ y no el IDE₁₅. Lo anterior se podría deber a que en el período vacacional existe una mayor contaminación en el agua.

Con base en los dos tipos de resultados del IDE, se determinó que es necesario aplicar un pretratamiento al agua de mar en condiciones extremas de contaminación (alto IDE), es decir en condiciones de período vacacional, para minimizar el valor del IDE antes de ingresar al proceso de OI, con la finalidad de aumentar la vida útil de las membranas.

Debido a la dificultad de transportar, instalar y operar la planta piloto *in situ*, se determinó realizar las pruebas finales con agua de mar sintética en planta piloto de OI (noviembre 2009) simulando las condiciones drásticas de contaminación, es decir, un agua de mar sintética con alto IDE. Para ello, se empleó sal natural de mar grado industrial conteniendo todos los elementos que conforman un agua de mar.

3.2. Preselección de dos tipos de pretratamiento y el post-tratamiento del proceso de ósmosis inversa para la desalación de agua de mar

Con base en el análisis bibliográfico realizado para la determinación de los pretratamientos más eficientes y aplicados a nivel mundial, se preseleccionaron los dos de tipo convencional (coagulación-floculación-filtración dual (CFF) y la filtración directa (FD*)) como pretratamientos para el agua de mar en estudio.

Cabe destacar que, las etapas comunes entre dichos pretratamientos son ajuste de pH al agua de mar cruda, precloración, filtración dual, filtración cartucho y decloración. La única etapa que difiere entre estos pretratamientos es la coagulación-floculación.

3.3. Pruebas de laboratorio para la determinación de los reactivos y sus dosis a utilizar en las etapas de los dos pretratamientos y el post-tratamiento del proceso de ósmosis inversa en planta piloto

3.3.1. Pruebas de laboratorio al agua de mar cruda de período no vacacional

A continuación se presentan los resultados y discusión de los reactivos y dosis aplicadas para cada etapa al agua de mar de período no vacacional (febrero de 2009):

3.3.1.1. Ajuste de pH al agua de mar cruda para los dos pretratamientos evaluados

Para este estudio se empleó el H_2SO_4 que ha sido aplicado en la mayoría de los pretratamientos para ajuste de pH y se comparó con otro ácido (HCl). Para determinar la dosis de H_2SO_4 y HCl 0.1 N a agregar al agua en estudio, se realizó una curva de neutralización con una muestra de agua de mar de 100 mL con la finalidad de determinar el comportamiento del pH al agregar diferentes dosis de ácido, la tabla I.1 muestra las diferentes dosis de ácido agregado con ambos ácidos evaluados (anexo I) y la figura 3.1 presenta el comportamiento del pH con respecto a la dosis de ácido para los dos reactivos evaluados.

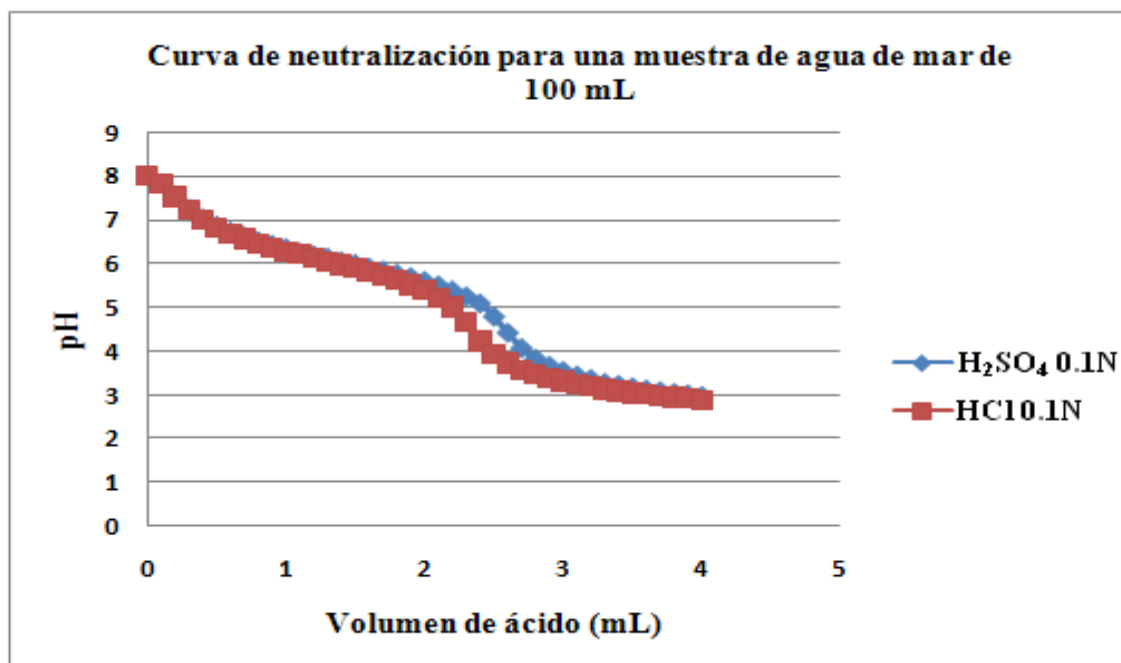


Figura 3. 1. Curva de neutralización del agua de mar de período no vacacional (febrero de 2009) para ambos ácidos evaluados.

La figura 3.1 muestra que para obtener un pH de 6.5 es necesario adicionar 7 mL de H₂SO₄ o HCl 0.1 N por litro de agua de mar en estudio; ya que ambos ácidos presentan un comportamiento similar.

Se requiere obtener un pH de 6.5 para el agua de mar cruda, ya que es considerado un valor de pH promedio para las pruebas de coagulación-floculación con los tres coagulantes propuestos, para una buena operación de las membranas de ósmosis inversa y para una eficiente desinfección.

3.3.1.2. Precloración del agua de mar para el pretratamiento de filtración directa

Para la determinación de la dosis de hipoclorito de sodio (NaOCl) a agregar para la precloración, se inició agregando diferentes dosis comprendidas en el intervalo de 0-10 mg/L a muestras de 500 mL de agua de mar en estudio. Al cabo de 0.5 y 2 horas se midió el cloro residual (tabla J.1 y figura J.1 en anexo J); mostrando que las dosis aplicadas a las pruebas son elevadas ya que se obtienen concentraciones de cloro residual significativamente superiores al valor requerido (0.5 mg/L). Por ello, se realizaron otras pruebas en un intervalo de dosis más bajo (tabla J.2 en anexo J) determinando el comportamiento del cloro residual con respecto a la dosis inicial de cloro a 0.5 y 2 horas de su aplicación como se muestra en la figura 3.2.

Cabe destacar que, estas pruebas se realizaron con agua de mar después de realizar la etapa de ajuste de pH al agua de mar cruda (6.5).

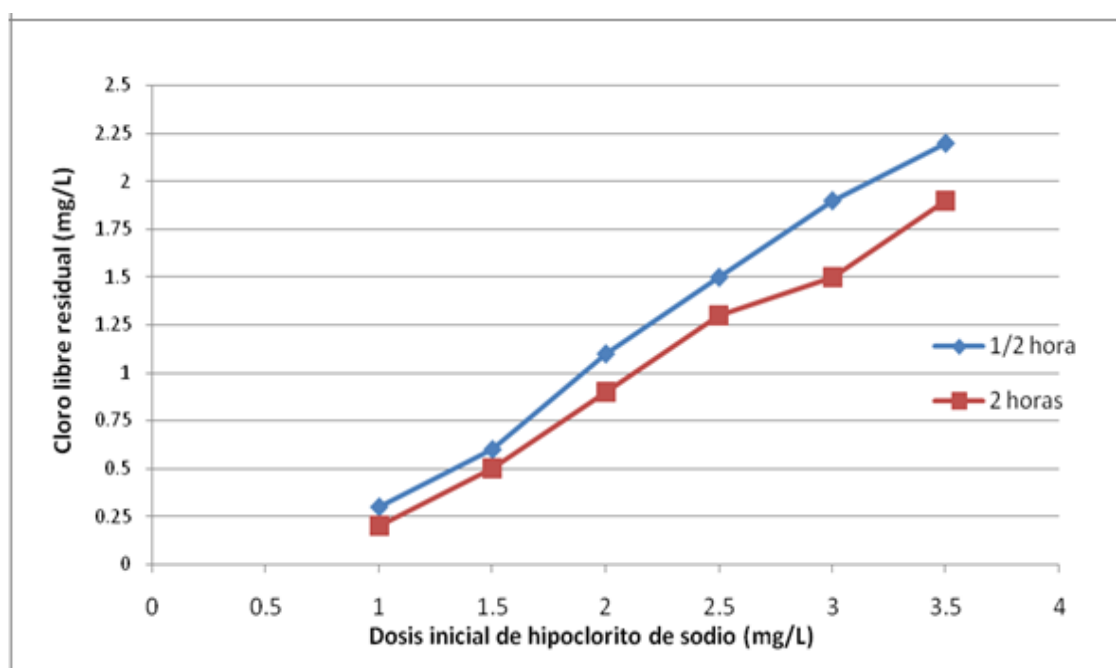


Figura 3. 2. Cloro residual en agua de mar de período no vacacional (febrero 2009) con ajuste de pH a 6.5 para el pretratamiento filtración directa.

Con la finalidad de realizar una adecuada precloración evitando biocontaminación en el lecho de los filtros dual, de cartucho y de las membranas de OI, en la figura 3.2 se muestran los valores de cloro residual a diferentes dosis de cloro inicial, a la media y dos horas de su aplicación; para una buena precloración y aplicando el pretratamiento de filtración directa o filtración cartuchos en la planta piloto de ósmosis inversa, se dosificará 1.5 mg/L de cloro

inicial, obteniendo un valor de cloro residual de 0.5 mg/L después de dos horas, siendo la dosis necesaria para eliminar los microorganismos presentes en el agua en estudio y el cloro residual será removido por medio de la etapa de decloración con bisulfito de sodio.

Para el caso en el que se aplique el pretratamiento coagulación-floculación en la planta piloto de OI, la dosis a aplicar de cloro inicial se determinará después de establecer el mejor coagulante y dosis a aplicar, esto se presenta a continuación:

3.3.1.3. Coagulación-Floculación para el pretratamiento de CCF

Los resultados obtenidos para las pruebas de coagulación-floculación en laboratorio a agua de mar en período no vacacional (febrero de 2009) se presentan a continuación:

Se inició con la aplicación de los tres coagulantes a evaluar, a una dosificación comprendida en el intervalo de 0-10 mg/L (anexo K) observando que a dosis inferiores a 6 mg/L de coagulantes se obtienen los mejores resultados en parámetros de calidad de agua; por ello, se realizaron nuevas pruebas estableciendo un intervalo menor de dosis que fue entre 1-6 mg/L (Anexo K).

La figura 3.3 muestra el comportamiento del parámetro color con respecto a la dosis de coagulante agregado en intervalo menor (1-6 mg/L).

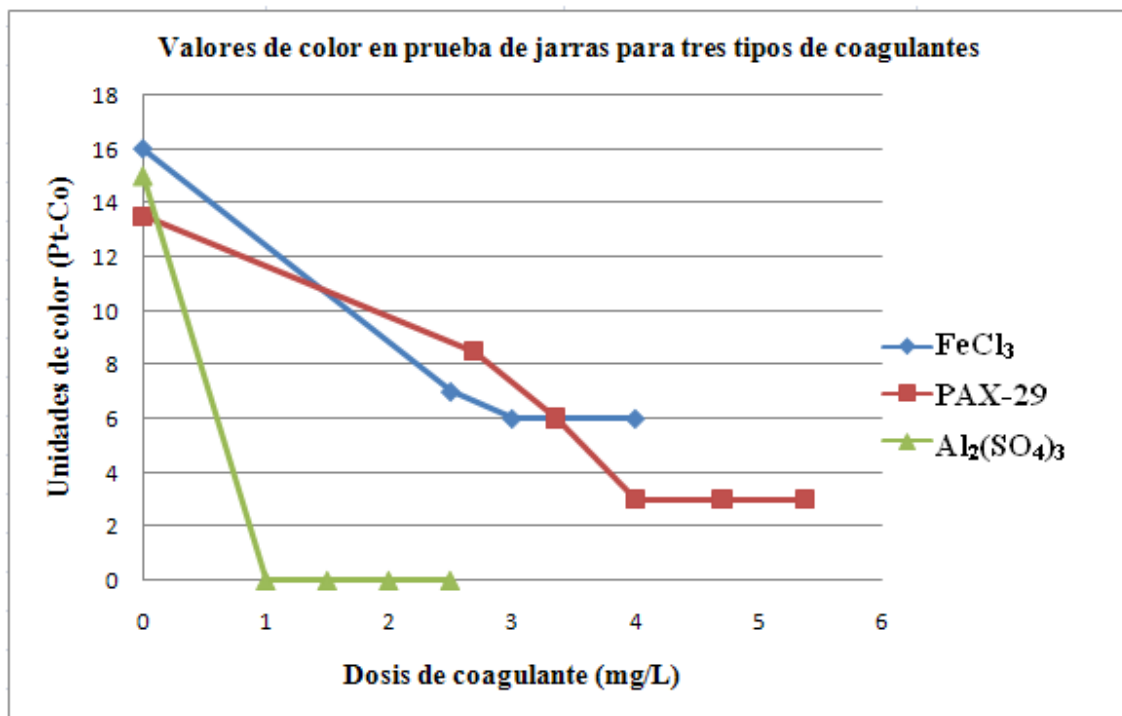


Figura 3. 3. Comportamiento del color residual en función de la dosis agregada de coagulante en un intervalo de 1-6 mg/L al agua de mar de período no vacacional (febrero de 2009) para el pretratamiento de CCF.

La figura 3.4 muestra el comportamiento del valor turbiedad residual en función de la dosis agregada de coagulante en un intervalo de 1-6 mg/L.

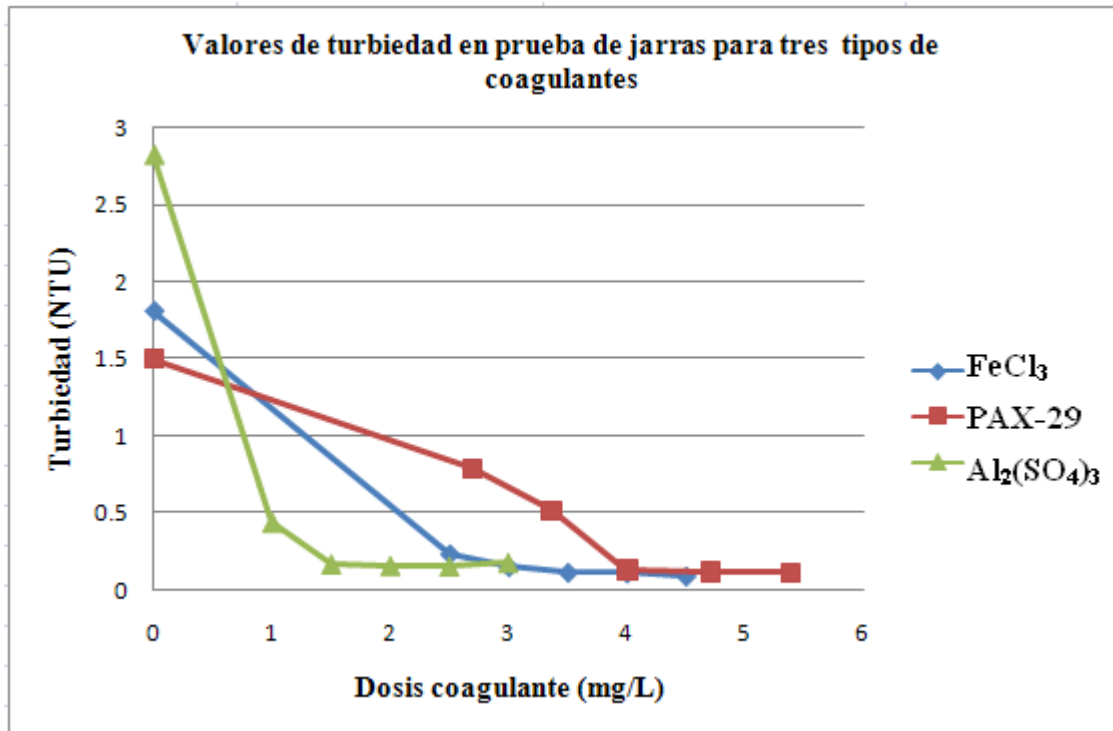


Figura 3. 4. Comportamiento de la turbiedad residual en función de la dosis agregada de coagulante en un intervalo de 1-6 mg/L al agua de mar de período no vacacional (febrero de 2009) para el pretratamiento de CCF.

Realizando el análisis de las figuras 3.3 y 3.4 se concluyó que el mejor coagulante aplicado es el sulfato de aluminio; debido a que a menor dosis de coagulante (aprox. 1 mg/L) se obtuvo la mejor calidad de agua con respecto a parámetros de calidad como color y turbiedad. Esto hace a este reactivo como el más eficiente para el pretratamiento de CCF.

3.3.1.4. Precloración del agua de mar para el pretratamiento CCF

Después de determinar el mejor coagulante se realizaron pruebas de jarras aplicando todas las etapas antes mencionadas:

Ajuste de pH: se aplicó una dosis aproximada de 7 mL de H₂SO₄ o HCl 0.1 N por litro para obtener un pH de 6.5 en el caso particular del agua de mar en estudio.

Precloración: para la prueba de jarras con el mejor coagulante se aplicaron diferentes dosis de cloro inicial (2, 3, 4, 5, 6 mg/L) para la precloración.

Coagulación-Floculación: para estas pruebas de jarras se determinó que la mejor dosis de sulfato de aluminio establecido como el mejor coagulante es de aproximadamente de 1 mg/L.

De esta forma se obtuvo la figura 3.5 que muestra el comportamiento del cloro residual con respecto a la dosis inicial, ya con las etapas ajuste de pH y coagulación-floculación aplicados.

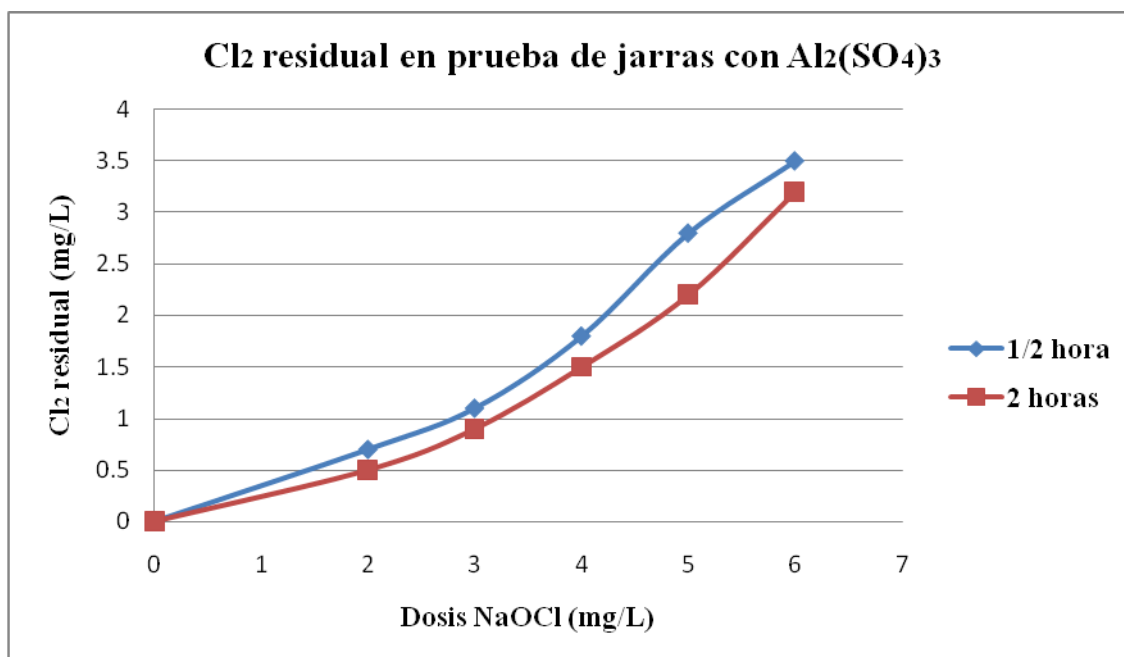


Figura 3. 5. Comportamiento de cloro residual después de ajuste de pH (6.5) al agua de mar cruda, precloración y coagulación-floculación al agua de mar de período no vacacional (febrero de 2009) para pretratamiento CCF.

Aplicando el proceso de coagulación-floculación con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ como mejor coagulante, la dosis de cloro inicial a aplicar será de aproximadamente 1.5 mg/L obteniendo una concentración de cloro residual de aproximadamente 0.5 mg/L, que será removido por la dosificación de bisulfito de sodio, con la finalidad de evitar daño irremediable a membranas de OI.

En cuanto a costos de reactivos coagulantes (\$4,250/tonelada de FeCl_3 , \$1,950/tonelada de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, \$2,300/tonelada de PAX-29) y considerando la dosis aplicada para obtener los mejores resultados de calidad de agua, el mejor coagulante es el sulfato de aluminio debido a que permitió obtener mejores resultados en calidad de agua, a menor dosis y menor costo respecto al cloruro férrico.

Cabe señalar que, estos resultados de pruebas de jarras fueron obtenidos utilizando el agua de mar del muestreo del mes de febrero 2009, es decir, en período no vacacional.

3.3.2. Pruebas de laboratorio al agua de mar cruda de período vacacional

3.3.2.1. Pruebas de laboratorio para pretratamiento de filtración directa

Las pruebas *in situ* para simular los pretratamientos preseleccionados para el proceso de OI se iniciaron aplicando en primer término **filtración directa**. Para este pretratamiento únicamente se aplicaron las etapas de ajuste de pH con ambos ácidos (HCl y H_2SO_4), precloración (NaOCl), aplicación de filtración directa (filtro dual a escala laboratorio) y decloración (NaHSO_3).

Para la determinación de los valores de IDE y caracterización de agua, se determinaron para filtración directa con y sin decloración; el detalle de los resultados se presentan en el anexo L (tabla L.1).

La figura 3.6 presenta el comportamiento del IDE del agua de mar con pretratamiento filtración directa aplicado *in situ* (abril 2009).

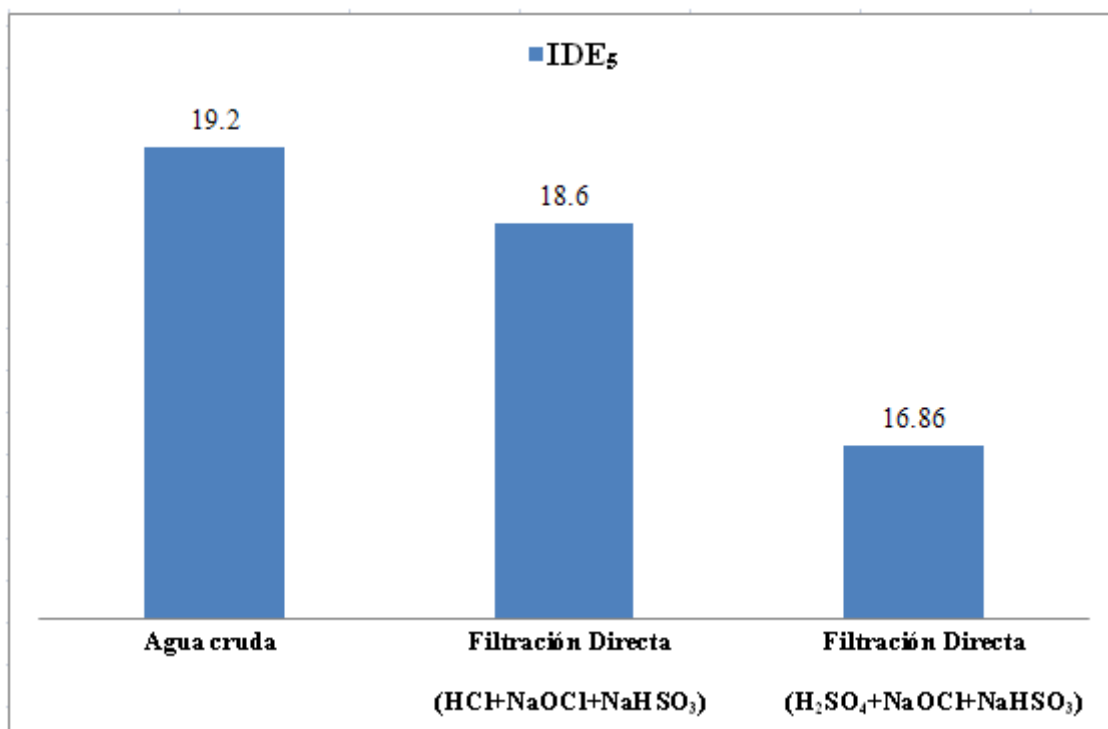


Figura 3. 6. Comportamiento del IDE₅ de las pruebas de laboratorio realizadas *in situ* en la época vacacional (abril 2009) para el pretratamiento filtración directa aplicando dos diferentes ácidos (HCl y H₂SO₄).

Realizando el análisis de los resultados obtenidos en el comportamiento del IDE; se obtuvo que el IDE del agua de mar cruda es muy alto debido a la contaminación por el período vacacional, a tal grado que solamente se pudieron medir valores de IDE a 5 minutos, pero no a 15 minutos.

Se aplicó la simulación del pretratamiento preseleccionado filtración directa aplicando ambos ácidos (HCl y H₂SO₄) obteniendo una remoción de contaminación muy baja ya que se obtuvieron valores de IDE₅ del agua pretratada aproximados al IDE₅ inicial o de agua de mar cruda; no siendo significativo la aplicación de este pretratamiento.

3.3.2.2. Pruebas de laboratorio para pretratamiento coagulación-floculación-filtración

Como se mencionó anteriormente, el agua de mar presentaba mayor contaminación; por ello, se propuso realizar nuevamente pruebas de jarras para el pretratamiento CCF empleando ambos ácidos (H₂SO₄ y HCl) para ajuste de pH, la precloración (NaOCl), los dos mejores coagulantes obtenidos en pruebas de jarras antes mencionadas (Al₂(SO₄)₃ y FeCl₃) con la finalidad de encontrar la mejor dosis del mejor coagulante para esta calidad de agua (abril 2009), la filtración dual y finalmente la decloración (NaHSO₃).

Los resultados obtenidos para estas pruebas de jarras *in situ* se describen a detalle en el anexo M. Las figuras 3.7 y 3.8 presentan el comportamiento de los valores de color y turbiedad para estas pruebas en función de la dosis agregada de coagulante.

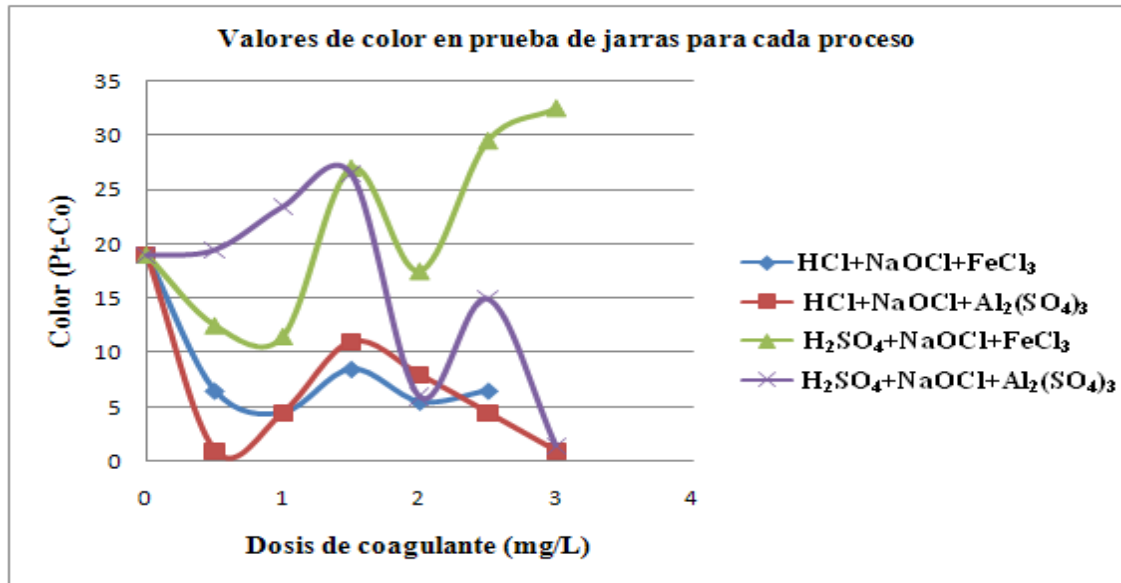


Figura 3. 7. Comportamiento del color residual en función de la dosis agregada de coagulante para pruebas de laboratorio realizadas *in situ* en época vacacional (abril de 2009) para el pretratamiento CCF.

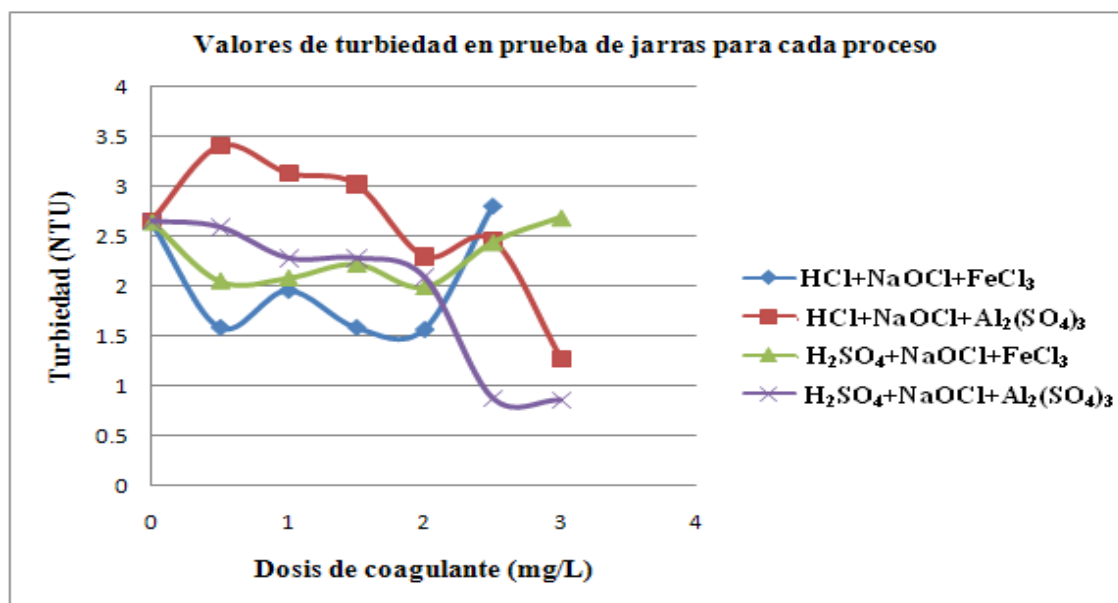


Figura 3. 8. Comportamiento de la turbiedad residual en función de la dosis agregada de coagulante para pruebas de laboratorio realizadas *in situ* en época vacacional (abril de 2009) para el pretratamiento CCF.

Realizando el análisis de los resultados obtenidos de color y turbiedad en las pruebas de jarras para el pretratamiento coagulación-floculación-filtración (figuras 3.7 y 3.8), se determinó que los mejores reactivos y dosis de los procesos a aplicar en la simulación del pretratamiento del proceso de OI en planta piloto para la desalación del agua de mar colectada en período vacacional (abril 2009) son las siguientes (tabla 3.4).

Cabe señalar que, para las pruebas de simulación del tren de pretratamiento del proceso de OI se aplicó también una etapa de **decoloración** con NaHSO₃, que consiste en la eliminación del cloro residual libre que se encuentra en el agua de mar pretratada con bisulfito de sodio; por

ello, se determinaron los valores de IDE para los mejores procesos sin deoloración (por ej. número de prueba 1) y con deoloración (por ej. número de prueba 1A).

Tabla 3. 4. Mejores reactivos y dosis a aplicar en las etapas del pretratamiento CCF de la planta piloto de OI con base en pruebas en laboratorio al agua de mar de período vacacional.

Número de prueba	Proceso	Dosis ácido 0.1N empleado (mL/L agua de mar)	Dosis NaOCl inicial (mg/L)/Cl ₂ residual libre (mg/L)	Dosis Coagulante (mg/L)
1	HCl+NaOCl+FeCl ₃	7	5/0.1	1
1A	HCl+NaOCl+FeCl ₃ +NaHSO ₃	---	---	---
2	HCl+NaOCl+Al ₂ (SO ₄) ₃	7	8/0.1	3
2A	HCl+NaOCl+Al ₂ (SO ₄) ₃ +NaHSO ₃	---	---	---
3	H ₂ SO ₄ +NaOCl+FeCl ₃	7	10/0.8	1
3A	H ₂ SO ₄ +NaOCl+FeCl ₃ +NaHSO ₃	---	---	---
4	H ₂ SO ₄ +NaOCl+ Al ₂ (SO ₄) ₃	7	10/0.5	3
4A	H ₂ SO ₄ +NaOCl+ Al ₂ (SO ₄) ₃ +NaHSO ₃	---	---	---
5	HCl+NaOCl+FeCl ₃	7	10/0.3	2
5A	HCl+NaOCl+FeCl ₃ +NaHSO ₃	---	---	---
6	H ₂ SO ₄ +NaOCl+FeCl ₃	7	10/1.6	2
6A	H ₂ SO ₄ +NaOCl+FeCl ₃ +NaHSO ₃	---	---	---

El procedimiento para la dosificación necesaria para eliminar el cloro residual libre con bisulfito de sodio se presenta en el anexo N. La figura 3.9 muestra el comportamiento del IDE en el pretratamiento coagulación-floculación-filtración aplicado *in situ* (abril 2009). El detalle de la determinación de los valores de IDE y caracterización de agua se presentan en el anexo O (tabla O.1 y O.2)

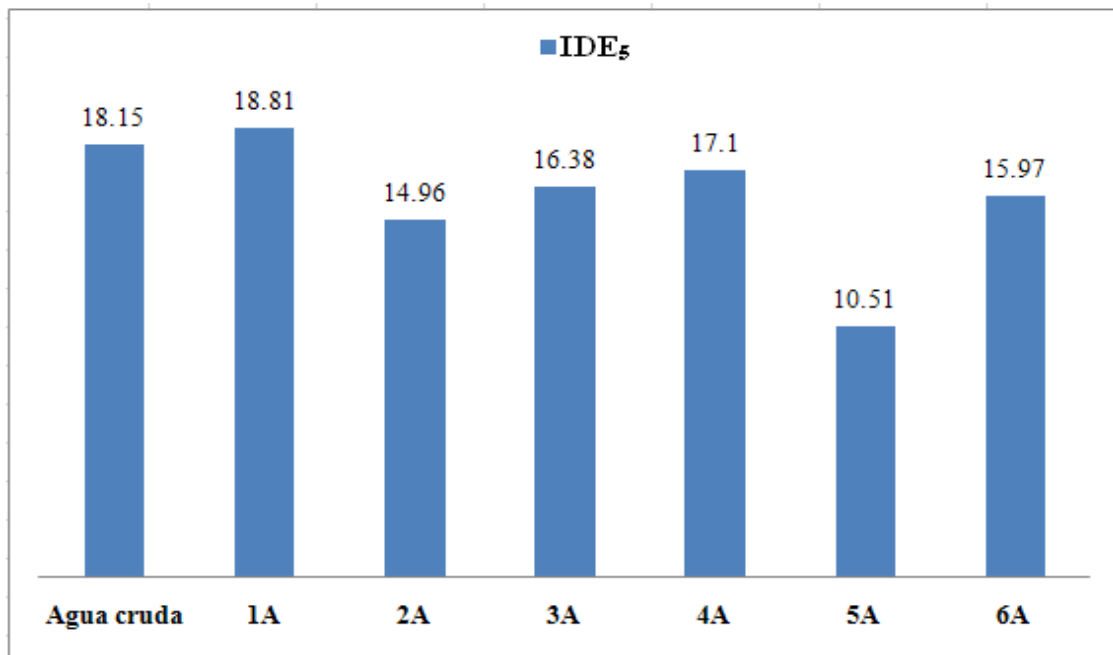


Figura 3. 9. Comportamiento del IDE₅ de las pruebas de laboratorio realizadas *in situ* en la época vacacional (abril de 2009) para el pretratamiento de CCF.

Realizando el análisis de los resultados obtenidos en el comportamiento del IDE₅, se obtuvo de igual forma que en el pretratamiento filtración directa, que el IDE₅ del agua de mar cruda es muy alto debido a la contaminación por el período vacacional y una remoción de contaminación muy baja, ya que se obtuvieron valores de IDE₅ de agua tratada aproximados al IDE inicial o de agua cruda.

Debido a que, para el pretratamiento coagulación-floculación-filtración se aplicaron los mejores resultados obtenidos en pruebas de jarras siendo el intervalo de dosis de 1-3 mg/L de los dos mejores coagulantes (FeCl₃ y Al₂(SO₄)₃); se consideró conveniente realizar nuevamente pruebas de IDE con dicho pretratamiento a dosis de coagulante más altas.

La aplicación de ambos pretratamientos (CFF y FD*) al agua de mar en período vacacional (abril de 2009) muestra de manera comparativa que el pretratamiento CFF puede minimizar el potencial de ensuciamiento del agua en estudio aumentando el intervalo de dosis de coagulante, mientras que con el pretratamiento filtración directa no se lograría dicho objetivo ya que este pretratamiento depende principalmente de la filtración (dual y cartucho) como etapa principal.

3.3.3. Pruebas de laboratorio para el post-tratamiento al agua producto o permeado del proceso de OI en una planta piloto de desalación

Para la realización de las pruebas en laboratorio para el post-tratamiento se colectó agua producto o permeado de la planta piloto y se obtuvieron los siguientes resultados:

El agua de permeado es considerada un agua desestabilizada debido al alto porcentaje de remoción de sales en el proceso de OI y bajo valor de pH; por ello, fue necesario aplicar un postratamiento (ajuste de pH al agua tratada) aplicando dos reactivos diferentes (NaOH y Ca(OH)₂) a una concentración de 250 mg/L, se realizó la curva de neutralización (figura 3.10) a pH 7 con ambos reactivos.

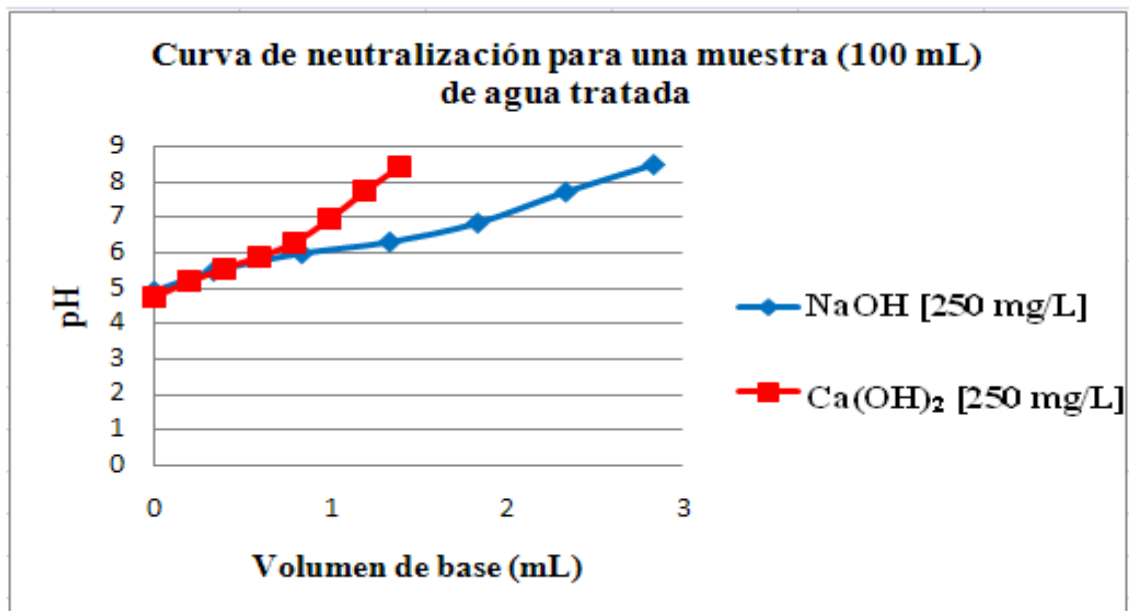


Figura 3. 10. Curva de neutralización del agua producto o permeado para ambas bases evaluadas.

Como se puede observar en la figura 3.10 el volumen necesario para obtener pH neutro con NaOH es aproximadamente de 1.9 mL para 100 mL, es decir que, se requiere 19 mL/L agua tratada.

Con respecto al $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se requieren aproximadamente 1 mL para 100 mL, es decir, 10 mL/L agua tratada; concluyendo que para este caso es mejor aplicar el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para neutralizar el pH debido a que se requiere menor volumen y es menos costoso.

En el agua de permealdo o producto no existe cloro residual, es decir, el agua esta propensa a volver a contaminarse de manera microbiológica; por ello, fue necesario agregar una dosis de cloro para protegerla de posterior contaminación aplicando 0.5 mg/L de cloro como post-tratamiento de agua de permealdo.

3.4. Resultados de pruebas en la planta piloto con pretratamientos preseleccionados y un sistema de ósmosis inversa

Cabe mencionar que, al preparar el agua de mar sintética (noviembre de 2009) se obtuvo un valor de IDE_5 muy similar al IDE_5 medido al agua de mar cruda en el muestreo de abril de 2009; sin embargo, cuando se realizaron las pruebas con agua sintética en planta piloto los filtros cartucho se saturaban rápidamente. Por ello, se realizó una pre-sedimentación al agua de mar sintética y se realizaron las pruebas con el sobrenadante ($\text{IDE}_{15} = 6.19$) aplicando posteriormente ambos pretratamientos en planta piloto.

3.4.1. Pruebas en planta piloto con el pretratamiento de filtración directa en la planta piloto de ósmosis inversa

En los resultados en planta piloto de ósmosis inversa aplicando el pretratamiento filtración directa se obtuvo lo siguiente:

Para los pretratamientos filtración directa y coagulación-floculación-filtración aplicados en planta piloto de OI se realizó el ajuste de pH con H_2SO_4 ya que en la curva de neutralización de ácidos (figura 3.1) se observó que no existe una diferencia entre uno u otro ácido y en las pruebas aplicadas *in situ* no existió una influencia significativa en el uso de uno u otro ácido para el pretratamiento; por ello, para las pruebas finales fue empleado el H_2SO_4 debido a su menor costo y mayor aplicación en plantas de desalación de agua de mar.

La figura 3.11 presenta el comportamiento del IDE_{15} a través del tiempo aplicando el pretratamiento filtración directa en planta piloto de ósmosis inversa.

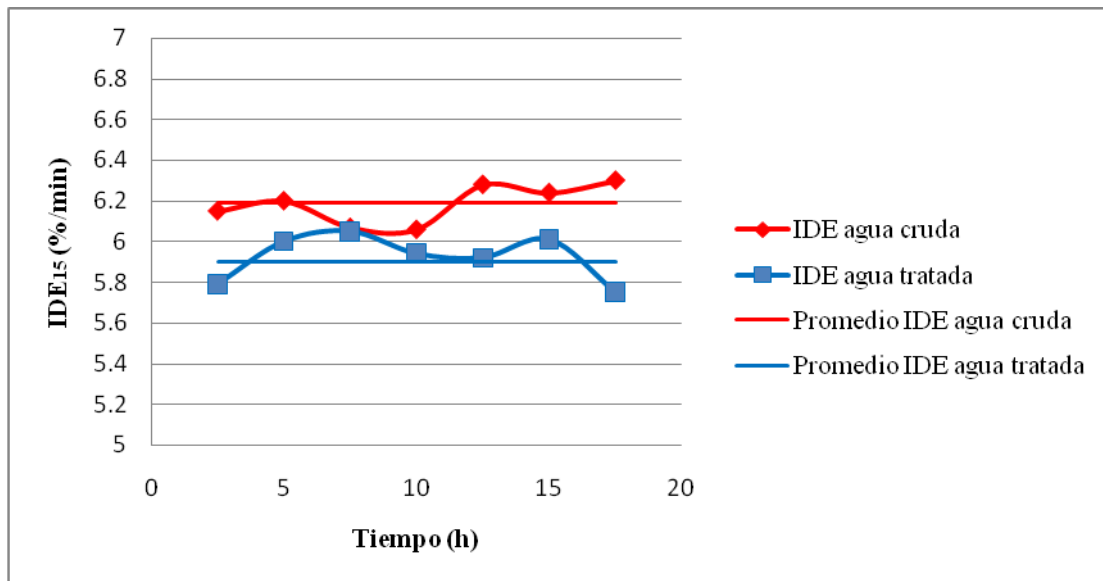


Figura 3. 11. Comportamiento de IDE₁₅ con filtración directa como proceso principal del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.

La figura 3.11 muestra como resultado principal que la remoción promedio del IDE₁₅ es de 4.68%, es decir, aplicando dicho pretratamiento se obtiene una reducción muy baja de ese parámetro, siendo un valor que se encuentra por arriba del valor máximo recomendado por proveedores (IDE₁₅ = 5) para la operación de membranas de ósmosis inversa.

La figura 3.12 muestra el comportamiento del caudal con respecto al tiempo aplicando el pretratamiento filtración directa en planta piloto de ósmosis inversa.

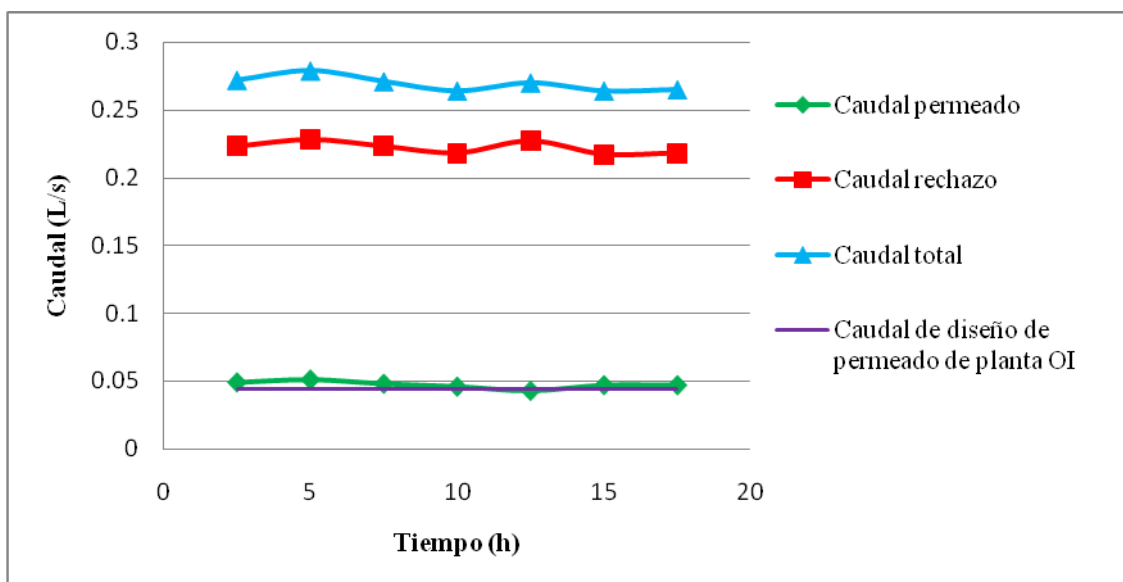


Figura 3. 12. Comportamiento del caudal con filtración directa como proceso principal del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.

La figura 3.12 presenta que el caudal promedio total empleado en estas pruebas fue de 0.27 L/s del cual se obtuvo en el proceso de ósmosis inversa un caudal promedio de permeado de 0.047 L/s y un caudal promedio de rechazo de 0.22 L/s; por otro lado, en dicha figura se muestra el

caudal de diseño de la planta piloto empleada (0.044 L/s \approx 1000 GPD agua producto o permeado) como se puede observar la planta piloto se operó de manera casi uniforme al caudal de diseño con respecto al tiempo.

La figura 3.13 presenta el comportamiento del porcentaje de recuperación aplicando el pretratamiento filtración directa en la planta piloto de ósmosis inversa.

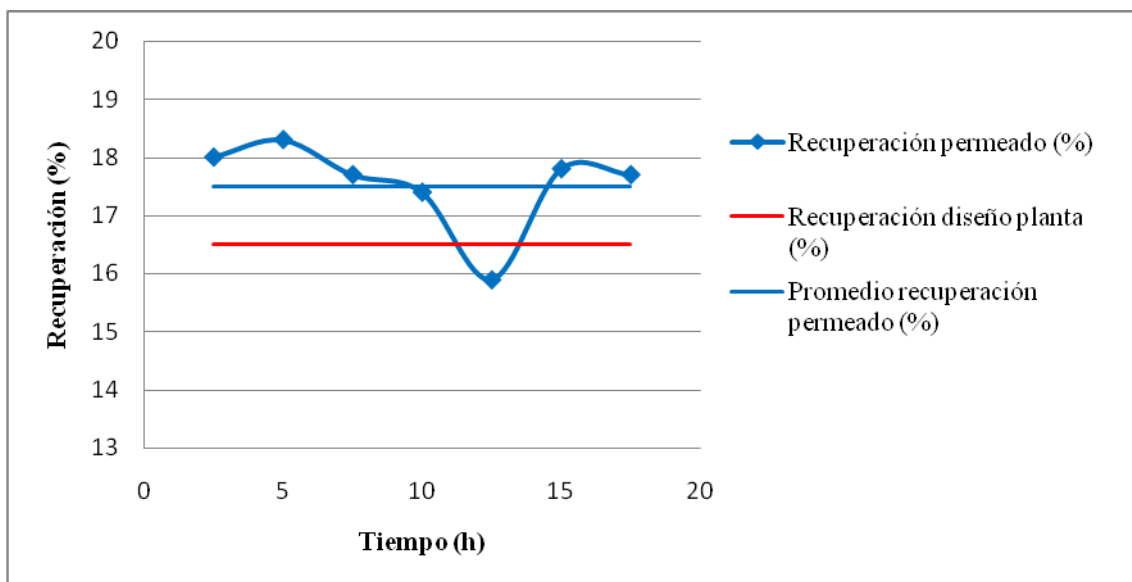


Figura 3. 13. Comportamiento del porcentaje de recuperación con filtración directa como proceso principal del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.

La figura 3.13 describe el comportamiento del porcentaje de recuperación del agua tratada en comparación con el porcentaje de recuperación de diseño de dicha planta, obteniéndose un porcentaje promedio de recuperación de 17.5% comparado con el porcentaje de diseño de recuperación de la planta (16.5%) se encuentra 1% por arriba de este último, no siendo significativa esta variación para la operación de la planta piloto.

La figura 3.14 muestra el comportamiento de los filtros empleados en planta piloto de ósmosis inversa (filtro dual y cartuchos) aplicando el pretratamiento filtración directa.

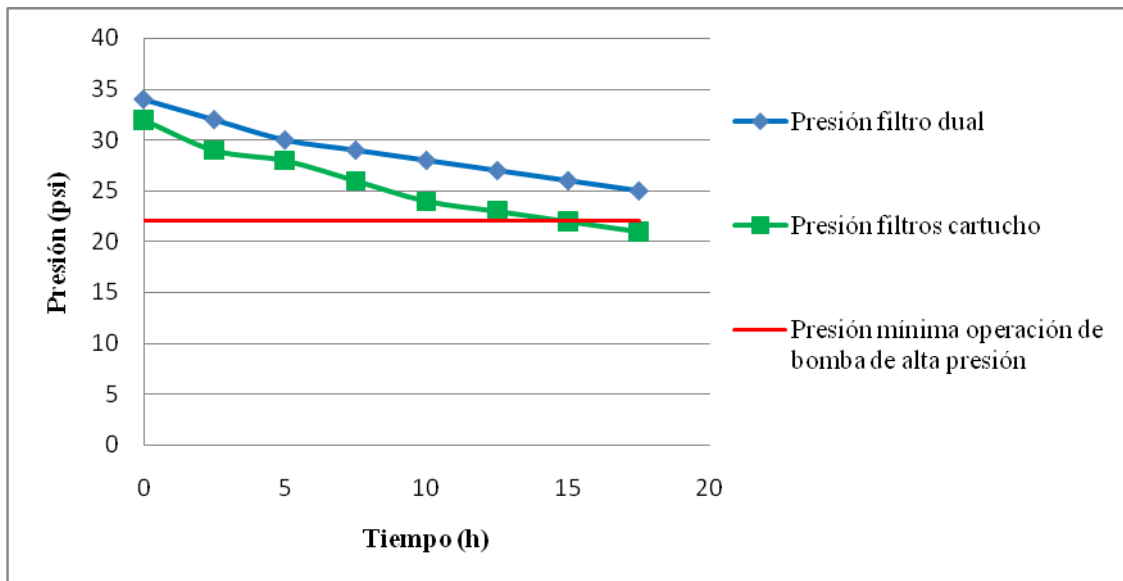


Figura 3. 14. Comportamiento de la presión en filtro dual y filtros cartucho instalados en las pruebas con filtración directa como proceso principal del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.

En la figura 3.14 se puede observar que existe una presión mínima de operación (22 psi) de la bomba de alta presión (BAP) de la planta piloto de OI, siendo éste el parámetro limitante de operación de la planta piloto. Por ello, los siguientes resultados se analizaron con base en el valor de dicho parámetro.

El filtro dual obtuvo una presión de alimentación inicial de 34 psi al operar la planta piloto (figura 3.14), como consecuencia de la operación de éste, se obtuvo una caída de presión de 9 psi a las 17.5 horas de operación y para alcanzar los 22 psi, se estima por extrapolación que deberán transcurrir aproximadamente 25 horas de operación para alcanzar ese valor.

En literatura se recomienda retrolavar el filtro dual cuando existe una diferencia de presión máxima de 1kg/cm^2 (14.2 psi); para esta planta piloto en particular, se estima por extrapolación que deberán transcurrir aproximadamente 30 horas de operación para su saturación y la necesidad de retrolavarlo.

Debido a lo mencionado anteriormente, el filtro dual presentaría la presión mínima de operación de la bomba de alta presión de la planta piloto en menor tiempo que la diferencia de presión máxima para retrolavar el filtro aplicando el pretratamiento filtración directa.

Con respecto al par de filtros cartucho (20 y 10 micras), se obtuvo una caída de presión de 10 psi en un período de tiempo de 15 horas obteniendo de esta forma la presión mínima de operación de la bomba de alta presión de la planta piloto debido a la saturación del filtro cartucho; por lo anterior, el filtro cartucho de 10 micras tiene que ser sustituido cada 15 horas de operación de la planta, siendo este último tiempo el máximo de operación de la planta piloto de ósmosis inversa aplicando el pretratamiento de filtración directa.

La figura 3.15 presenta el comportamiento del pH en la planta piloto de ósmosis inversa aplicando el pretratamiento filtración directa.

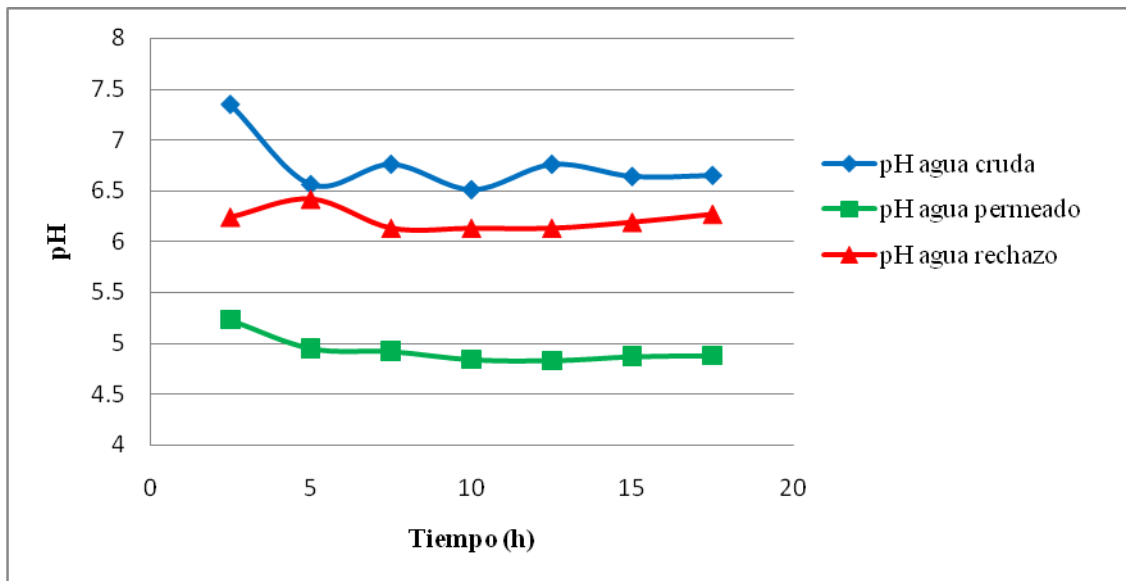


Figura 3. 15. Comportamiento del pH con filtración directa como proceso principal del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.

La figura 3.15 muestra el comportamiento del pH a través del tiempo, obteniendo un valor promedio en el agua de permeado de 4.93, debido a la remoción de sales por el sistema de OI y un pH promedio de agua de rechazo de 6.22 aplicando el pretratamiento filtración directa en planta piloto de OI.

La figura 3.16 presenta el comportamiento de la turbiedad en cada etapa del pretratamiento (filtración dual y cartucho) aplicando filtración directa en planta piloto de ósmosis inversa.

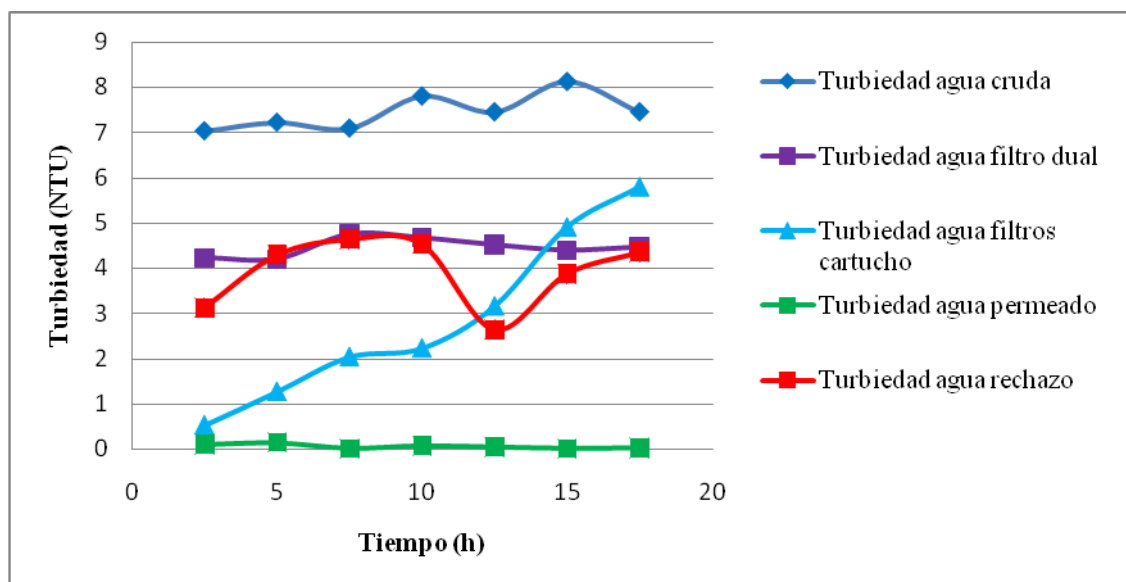


Figura 3. 16. Comportamiento de la turbiedad con filtración directa como proceso principal del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.

Con base en los resultados mostrados en la figura 3.16 se determinó que la turbiedad promedio del agua de mar cruda fue de 7.45 NTU, mientras que la turbiedad promedio del agua de permeado fue de 0.06 NTU y de 3.92 NTU para la turbiedad del agua de rechazo. La turbiedad

promedio del agua de filtro dual fue de 4.47 NTU y de 2.85 NTU para turbiedad promedio de filtros cartucho.

Debido a lo anterior, se obtiene que el porcentaje de remoción promedio de turbiedad por el filtro dual es de 40% con respecto a la turbiedad inicial, mientras que para los filtros cartucho es de 36.2% con respecto a la turbiedad del efluente del filtro dual. El porcentaje de remoción promedio del pretratamiento filtración directa en planta piloto de OI fue de 61.7% con respecto a la turbiedad inicial, mientras que el porcentaje de remoción promedio de la turbiedad aplicando todo el tren de tratamiento (pretratamiento con filtración directa como proceso principal y OI) fue de 99.2% con respecto a la turbiedad inicial. Cabe señalar que, el valor de la turbiedad a la salida de los filtros cartucho aumentó con respecto al tiempo siendo éstos los que más rápido se saturan y, por lo mismo, para el cálculo del porcentaje se empleó el promedio.

La figura 3.17 muestra el valor del color en cada etapa del pretratamiento de filtración directa (filtración dual y cartucho) en planta piloto de ósmosis inversa.

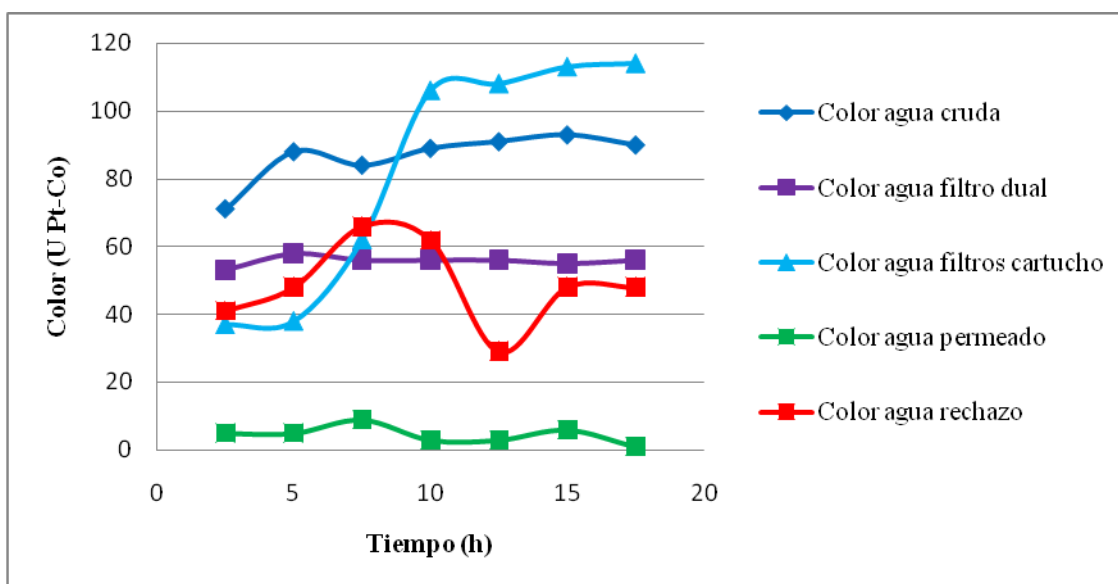


Figura 3. 17. Comportamiento del color con filtración directa como proceso principal del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.

En la figura 3.17 se observó que el color promedio del agua cruda es de 87 unidades Pt-Co, mientras que el color promedio para el agua de permeado es de 5 unidades y 49 unidades para color promedio en el agua de rechazo. El color promedio para el agua de filtro dual es de 56 unidades; cabe señalar que, el comportamiento del color en el agua de filtros cartucho es variable con respecto al tiempo; por ello, no se determinó un promedio para este caso, se tomó el valor de color con cartuchos nuevos (37 U Pt-Co).

Debido a lo mencionado anteriormente, el porcentaje de remoción de color en el filtro dual es de 35.3% con respecto al valor de color del agua de mar cruda, mientras que para el caso de filtros cartucho se obtuvo una remoción de hasta 34% con cartuchos nuevos con respecto al valor de color del efluente de filtro dual. Aplicando el pretratamiento filtración directa y proceso de ósmosis inversa se obtuvo un porcentaje de remoción de color de 94.2% con respecto al valor de color del agua de mar cruda.

La figura 3.18 muestra el comportamiento de la conductividad eléctrica a través del tiempo aplicando el pretratamiento filtración directa en planta piloto.

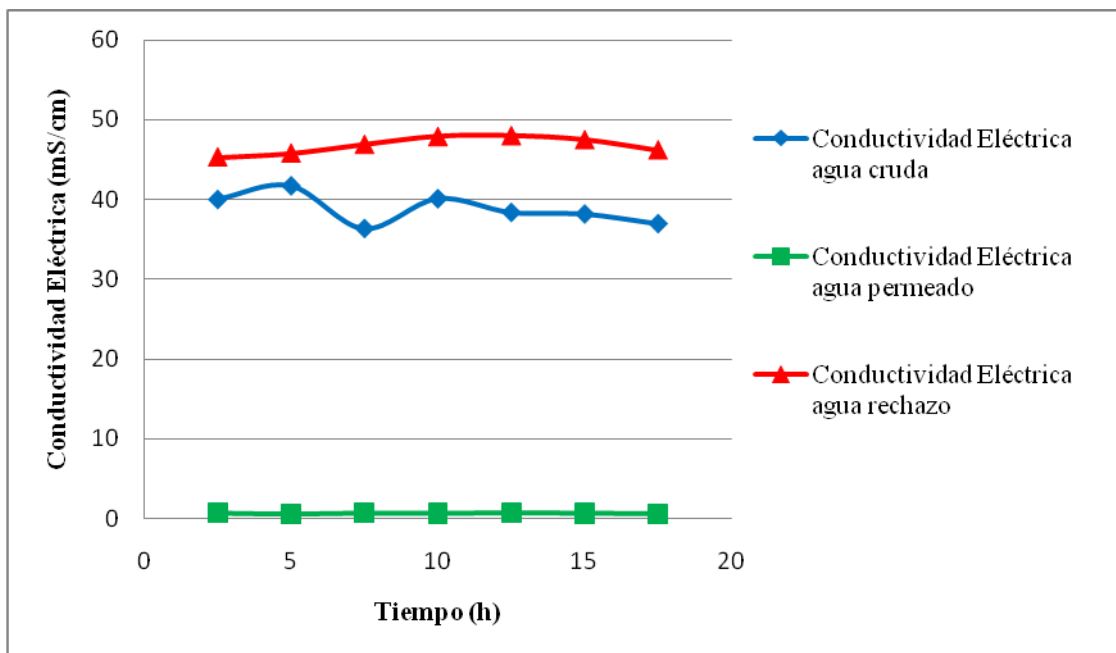


Figura 3. 18. Comportamiento de la conductividad eléctrica con filtración directa como proceso principal del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.

En la figura 3.18 se observaron los comportamientos de la conductividad eléctrica en los tres tipos de agua, obteniendo una conductividad eléctrica promedio del agua de mar cruda de 38.8 mS/cm, mientras que para el agua de permeado fue de 0.645 mS/cm y 46.8 mS/cm para el agua de rechazo. Con base en los resultados anteriores se obtuvo un porcentaje de remoción de 98.3% aplicando el pretratamiento filtración directa y proceso de ósmosis inversa.

Cabe destacar que, el aumento promedio en conductividad eléctrica en el agua de rechazo fue de 8 mS/cm representando un 20.6% con respecto a la conductividad eléctrica inicial en agua de mar cruda.

3.4.2. Pruebas en planta piloto con el pretratamiento de coagulación-floculación-filtración y sistema de ósmosis inversa

Con lo que respecta a los resultados obtenidos aplicando el pretratamiento preseleccionado coagulación-floculación-filtración y proceso de ósmosis inversa se obtuvo lo siguiente:

Para las pruebas con pretratamiento coagulación-floculación-filtración en planta piloto de ósmosis inversa, se determinó realizar las pruebas con el coagulante sulfato de aluminio debido a la obtención de mejor calidad de agua a menor dosis en pruebas de laboratorio.

La figura 3.19 presenta el valor del IDE₁₅ en función de la dosis de coagulante ((Al₂(SO₄)₃) en planta piloto de ósmosis inversa.

Los resultados obtenidos para el valor del IDE₁₅ aplicando la mejor dosis de Al₂(SO₄)₃ se presenta en la figura 3.20.

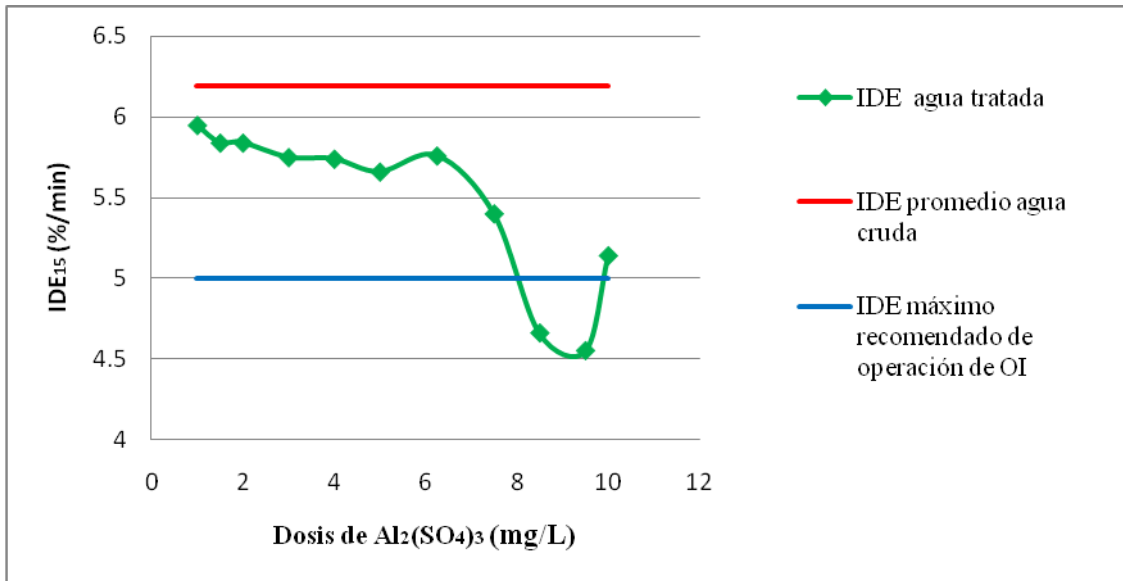


Figura 3. 19. Comportamiento del IDE₁₅ en función de la dosis aplicada de Al₂(SO₄)₃ al agua de mar pretratada por coagulación-floculación-filtración como procesos principales del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.

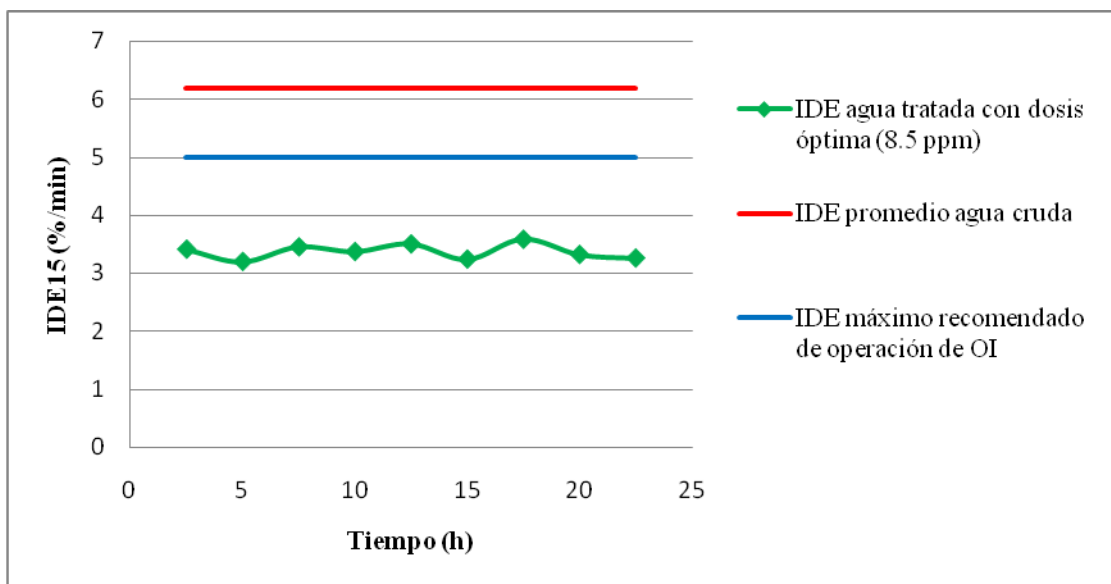


Figura 3. 20. Comportamiento del IDE₁₅ del agua de mar, aplicando la mejor dosis de Al₂(SO₄)₃ en coagulación-floculación-filtración como procesos principales del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.

La figura 3.19 muestra como resultados principales: a) el IDE₁₅ promedio del agua de mar cruda fue de 6.19 %/min, b) el comportamiento del IDE₁₅ a las diferentes dosis del mejor coagulante (Al₂(SO₄)₃) siendo que la mejor dosis aplicada fue de 8.5 mg/L obteniendo un valor de IDE₁₅ menor al máximo recomendado para operación en ósmosis inversa (IDE₁₅ = 5), c) con base en el resultado anterior se realizaron pruebas a dicha dosis (figura 3.20) obteniendo como valor promedio de IDE₁₅ de 3.37 %/min a través del tiempo de operación, es decir, obteniendo un porcentaje de remoción de IDE₁₅ de 45.6%.

Cabe destacar que, el valor obtenido de IDE_{15} (3.37 %/min) a la mejor dosis de coagulante se encuentra muy cercano al valor recomendado $IDE < 3$ (varios meses para aplicación de limpieza) establecido por proveedores de membranas con la finalidad de aumentar la vida útil de las membranas de ósmosis inversa (tabla 3.2).

La figura 3.21 muestra el comportamiento del caudal con respecto al tiempo aplicando el pretratamiento coagulación-floculación-filtración en planta piloto de ósmosis inversa.

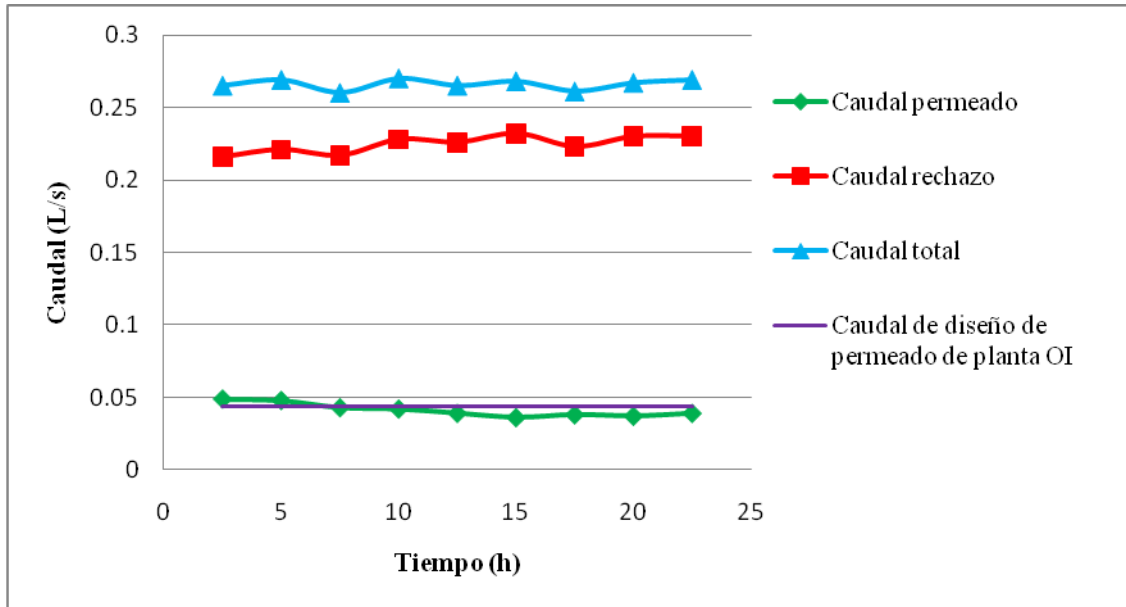


Figura 3. 21. Comportamiento del caudal del agua de mar pretratada por coagulación-floculación-filtración como procesos principales del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.

La figura 3.21 presenta que el caudal promedio total empleado en el pretratamiento fue de 0.266 L/s del cual se obtuvo un caudal promedio de permeado de 0.041 L/s y un caudal promedio de rechazo de 0.225 L/s; por otro lado, en dicha figura se muestra el caudal de diseño de la planta piloto empleada (0.044 L/s \approx 1000 GPD agua producto o permeado) como se puede observar la planta piloto se operó de manera casi uniforme al caudal de diseño con respecto al tiempo.

La figura 3.22 presenta el comportamiento del porcentaje de recuperación de la planta piloto de ósmosis inversa aplicando el pretratamiento coagulación-floculación-filtración.

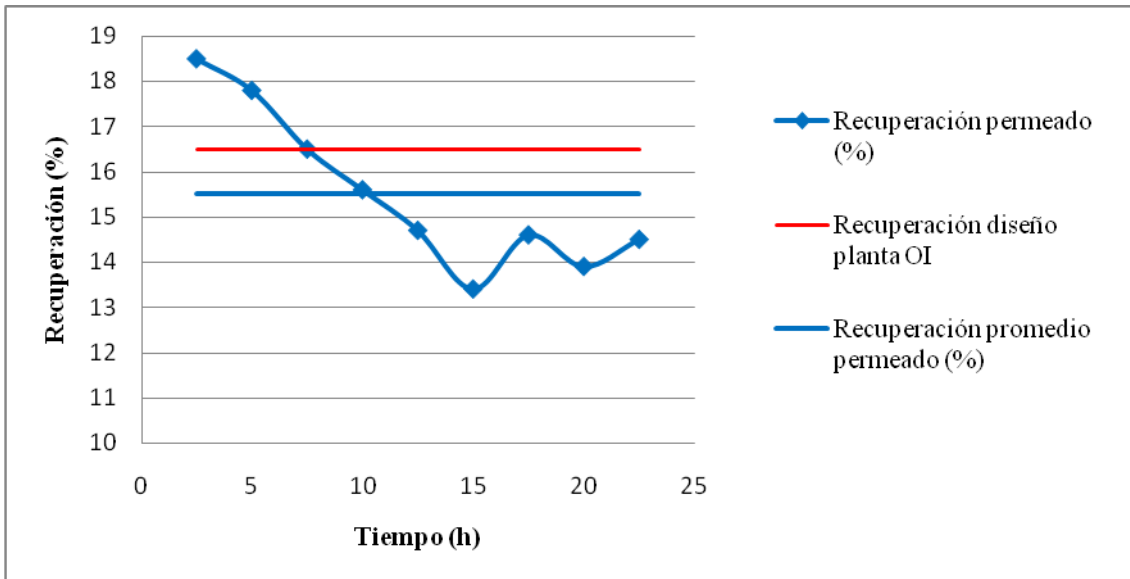


Figura 3. 22. Comportamiento del porcentaje de recuperación por coagulación-floculación-filtración como procesos principales del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.

La figura 3.22 describe el comportamiento del porcentaje de recuperación del agua tratada en comparación con el porcentaje de recuperación de diseño de dicha planta, obteniéndose un porcentaje promedio de recuperación de 15.5% comparado con el porcentaje de diseño de recuperación de la planta (16.5%) se encuentra 1% por debajo de este último; no siendo representativa la diferencia.

La figura 3.23 muestra el comportamiento de los filtros empleados en planta piloto de ósmosis inversa (filtro dual y cartuchos) aplicando el pretratamiento coagulación-floculación-filtración.

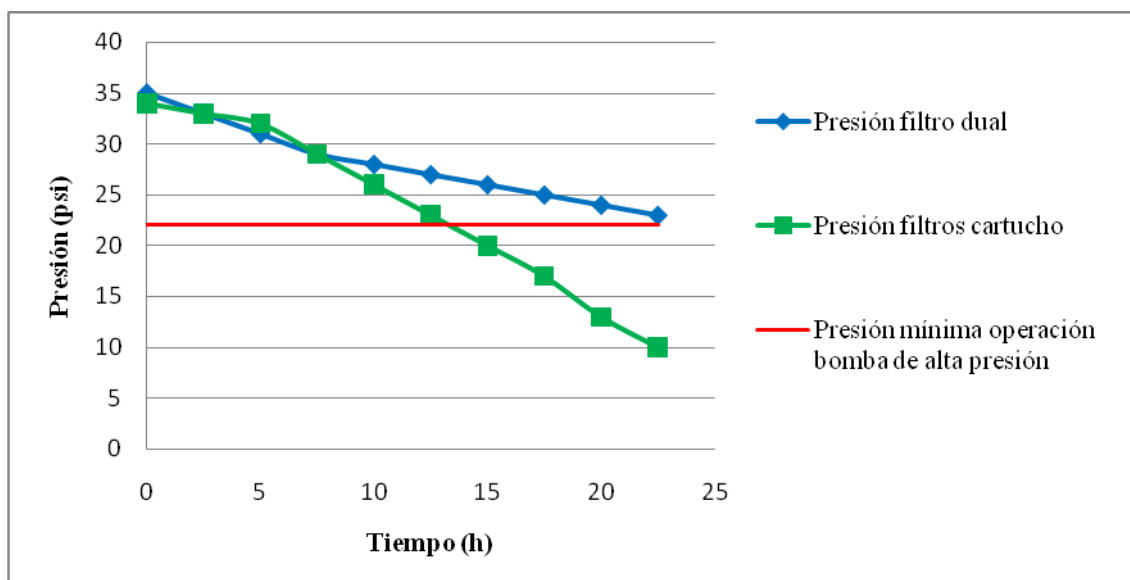


Figura 3. 23. Comportamiento de la presión en filtro dual y filtros cartucho instalados en las pruebas con coagulación-floculación-filtración como procesos principales del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.

En la figura 3.23 se observó que existe una presión mínima de operación de la bomba de alta presión de la planta piloto de ósmosis inversa (22 psi), siendo el principal parámetro limitante de operación de la planta piloto. Por ello, los siguientes resultados se analizaron con base en el valor de dicho parámetro.

El filtro dual obtuvo una presión de alimentación inicial de 35 psi al operar la planta piloto (figura 3.23), como consecuencia de la operación de éste, se obtuvo una caída de presión de 12 psi a las 22.5 horas de operación y para alcanzar los 22 psi, se estima por extrapolación que deberán transcurrir aproximadamente 25 horas de operación para alcanzar ese valor.

En literatura se recomienda retrolavar el filtro dual cuando existe una diferencia de presión máxima de $1\text{kg}/\text{cm}^2$ (14.2 psi); para esta planta piloto en particular, se estima por extrapolación que deberán transcurrir aproximadamente 30 horas de operación para su saturación y la necesidad de retrolavarlo.

Debido a lo mencionado anteriormente, el filtro dual presentaría la presión mínima de operación de la bomba de alta presión de la planta piloto en menor tiempo que la diferencia de presión máxima para retrolavar el filtro aplicando el pretratamiento coagulación-floculación-filtración.

Con respecto a los filtros cartucho (20 y 10 micras), se obtuvo una caída de presión de 12 psi en un período de tiempo aproximado de 13 horas obteniendo de esta forma la presión mínima de operación de la bomba de alta presión de la planta piloto debido a la saturación del filtro cartucho; por lo anterior, el filtro cartucho de 10 micras tienen que ser sustituido cada 13 horas de operación de la planta, siendo este último tiempo el máximo de operación de la planta piloto de ósmosis inversa aplicando el pretratamiento de coagulación-floculación-filtración.

La figura 3.24 presenta el comportamiento del pH en la planta piloto de ósmosis inversa aplicando el pretratamiento coagulación-floculación-filtración.

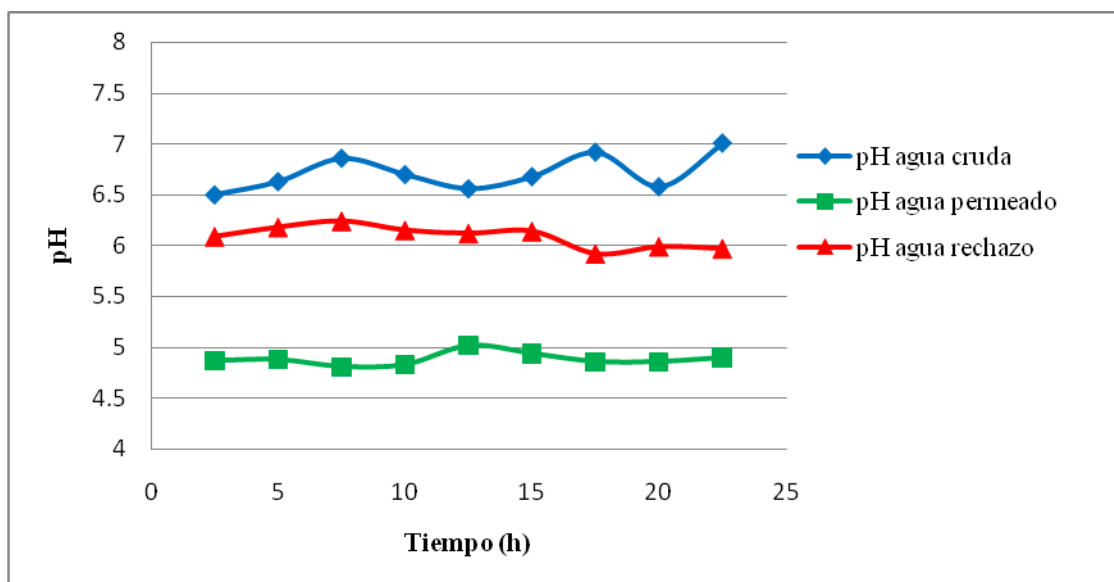


Figura 3. 24. Comportamiento del pH con coagulación-floculación-filtración como procesos principales del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.

La figura 3.24 muestra el comportamiento del pH a través del tiempo, obteniendo un pH promedio del agua de permeado de 4.89 y un pH promedio del agua de rechazo de 6.09 aplicando el pretratamiento coagulación-floculación-filtración en planta piloto de ósmosis inversa.

La figura 3.25 presenta el comportamiento de la turbiedad en cada etapa del pretratamiento aplicando coagulación-floculación-filtración en planta piloto de ósmosis inversa.

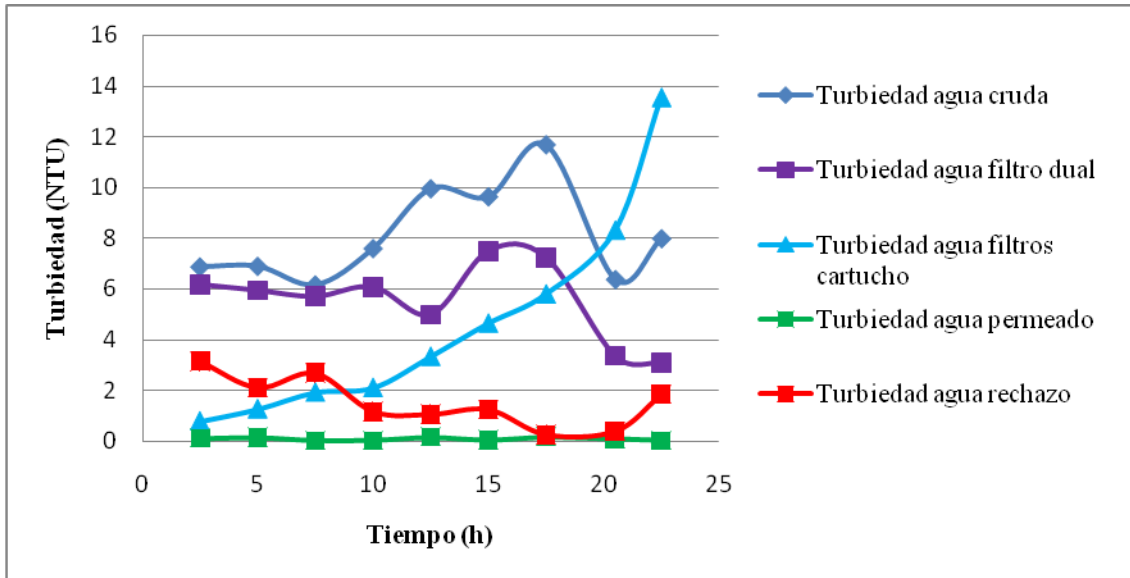


Figura 3. 25. Comportamiento de la turbiedad con coagulación-floculación-filtración como procesos principales del pretratamiento del proceso de OI en una planta piloto de desalación.

Con base en los resultados mostrados en la figura 3.25 se determinó que la turbiedad promedio del agua de mar cruda fue de 8.13 NTU, mientras que la turbiedad promedio del agua de permeado fue de 0.09 NTU y de 1.55 NTU para la turbiedad de agua de rechazo. La turbiedad promedio del agua de filtro dual fue de 5.57 NTU y de 4.64 NTU para turbiedad promedio de filtros cartucho.

Debido a lo anterior, se obtuvo que el porcentaje de remoción promedio de turbiedad por el filtro dual es de 31.5% con respecto a la turbiedad inicial, mientras que para los filtros cartucho es de 16.7% con respecto a la turbiedad del efluente del filtro dual. El porcentaje de remoción promedio del pretratamiento coagulación-floculación-filtración en planta piloto de ósmosis inversa fue de 42.9% con respecto a la turbiedad inicial, mientras que el porcentaje de remoción promedio de la turbiedad aplicando todo el proceso (coagulación-floculación-filtración y ósmosis inversa) fue de 98.9% con respecto a la turbiedad inicial. Cabe señalar que, el valor de la turbiedad a la salida de los filtros cartucho aumentó con respecto al tiempo siendo éstos los que más rápido se saturan y, por lo mismo, para el cálculo del porcentaje se empleó el promedio.

La figura 3.26 muestra el comportamiento del parámetro color en cada etapa del pretratamiento coagulación-floculación-filtración en planta piloto de ósmosis inversa.

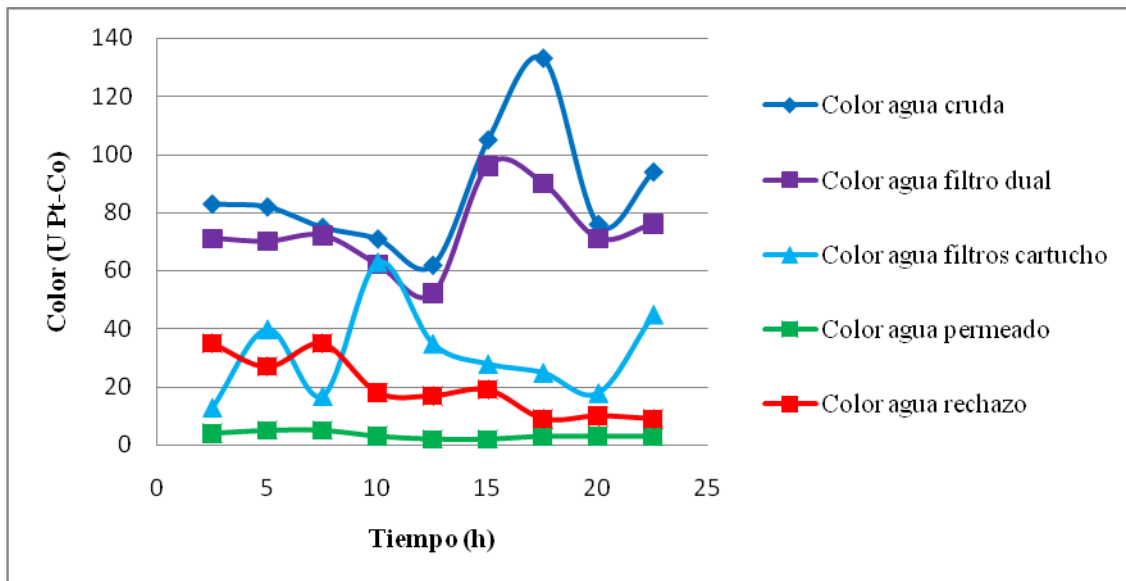


Figura 3. 26. Comportamiento del color con coagulación-floculación-filtración como proceso principal del pretratamiento de ósmosis inversa.

La figura 3.26 presenta como resultados que el color promedio del agua de mar cruda es 87 unidades Pt-Co, mientras que el color promedio para el agua de permeado es de 3 unidades y 20 unidades para color promedio en el agua de rechazo. El color promedio para el agua de filtro dual es de 73 unidades y 32 unidades para color promedio del agua de filtros cartucho.

Debido a lo mencionado anteriormente, el porcentaje de remoción de color en el filtro dual es de 16.1% con respecto al valor de color del agua de mar cruda, mientras que para el caso de filtros cartucho se obtuvo una remoción de 56.2% con respecto al valor de color del efluente de filtro dual; aplicando el pretratamiento coagulación-floculación-filtración se obtuvo una remoción promedio de dicho parámetro de 63.2% con respecto al valor de color del agua de mar cruda y en conjunto con el proceso de OI se obtuvo un porcentaje de remoción de color de 96.6% con respecto al valor de color del agua de mar cruda.

La figura 3.27 muestra el comportamiento de la conductividad eléctrica a través del tiempo aplicando el pretratamiento coagulación-floculación-filtración en planta piloto.

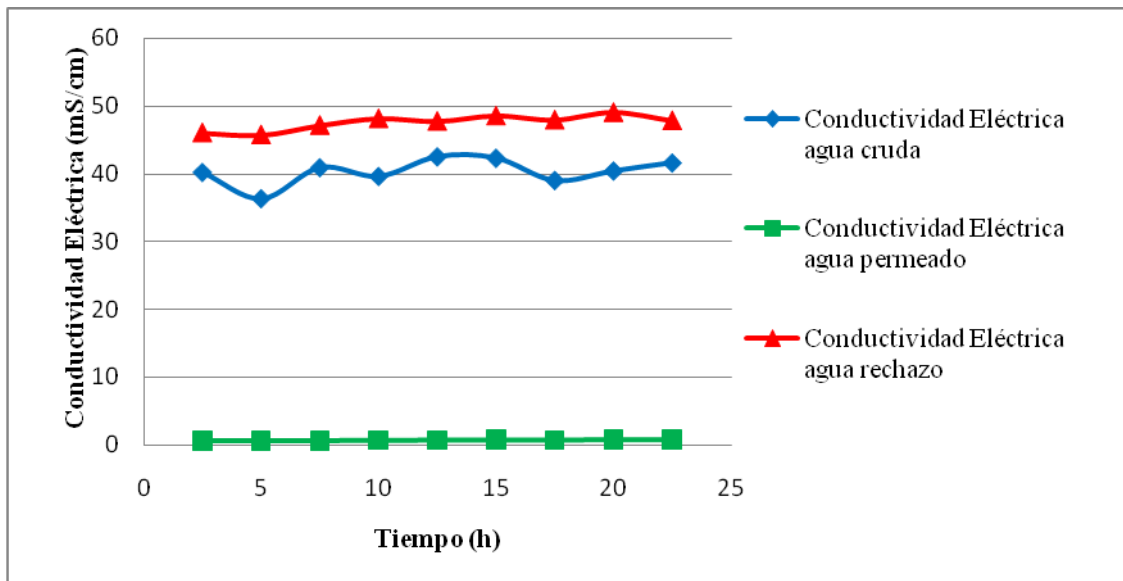


Figura 3. 27. Comportamiento de la conductividad eléctrica con coagulación-floculación-filtración como proceso principal del pretratamiento de ósmosis inversa.

En la figura 3.27 se observaron los comportamientos de la conductividad eléctrica en los tres tipos de agua, obteniendo una conductividad eléctrica promedio del agua de mar cruda de 40.3 mS/cm, mientras que para el agua de permeado fue de 0.743 mS/cm y 47.5 mS/cm para el agua de rechazo. Con base en los resultados anteriores se obtuvo un porcentaje de remoción de 98.2% aplicando el pretratamiento coagulación-floculación-filtración y proceso de ósmosis inversa.

Cabe destacar que, el aumento promedio en conductividad eléctrica en el agua de rechazo fue de 7.2 mS/cm representando un 17.9% con respecto a la conductividad eléctrica del agua de mar cruda.

3.5. Selección del mejor pretratamiento a aplicar, de los dos preseleccionados, con base en la comparación de valores de parámetros determinados en pretratamientos (IDE, turbiedad, color, etc.)

Para la determinación del mejor pretratamiento aplicado en planta piloto de OI se llevó a cabo el siguiente análisis de resultados comparando ambos pretratamientos aplicados:

La figura 3.28 muestra la comparación del parámetro IDE_{15} para ambos pretratamientos aplicados en planta piloto de ósmosis inversa.

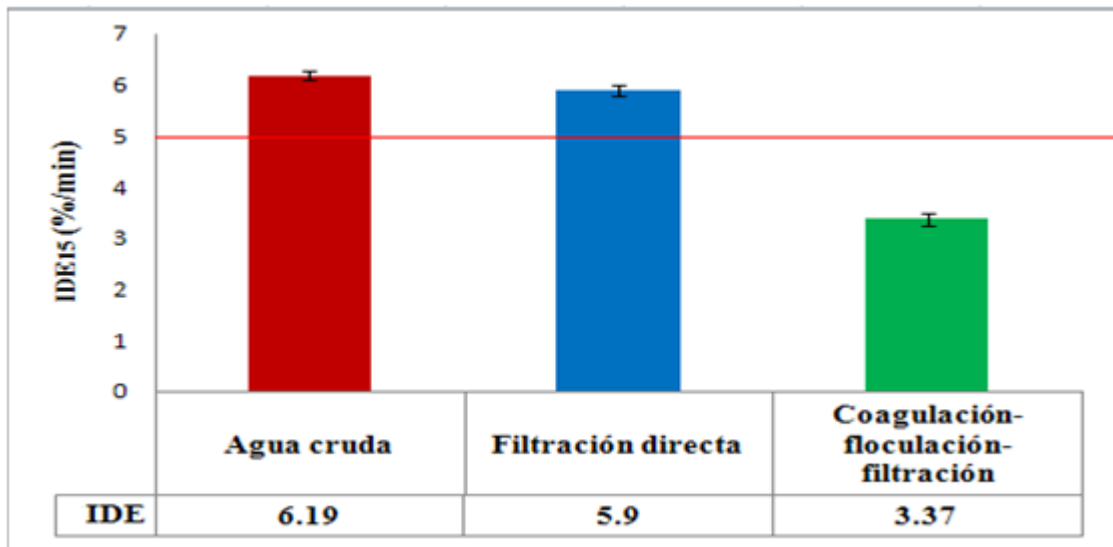


Figura 3. 28. Comparación del valor del IDE₁₅ medido al agua de mar cruda y en el efluente de los dos tipos de pretratamientos preseleccionados aplicados a la planta piloto de desalación por OI.

La figura 3.28 muestra que el pretratamiento coagulación-floculación-filtración es más eficiente removiendo un 45.6% de dicho parámetro y encontrándose por debajo del valor máximo recomendado por proveedores de membranas para la operación de ósmosis inversa; por otro lado, el porcentaje de remoción del IDE₁₅ con pretratamiento filtración directa fue de 4.68% siendo muy bajo y encontrándose el valor del IDE₁₅ por arriba del valor máximo recomendado.

La figura 3.29 presenta los valores de turbiedad por etapa del proceso para cada pretratamiento y la figura 3.30 presenta la comparación de los porcentajes de remoción de turbiedad por etapa del proceso para cada pretratamiento aplicado en planta piloto.

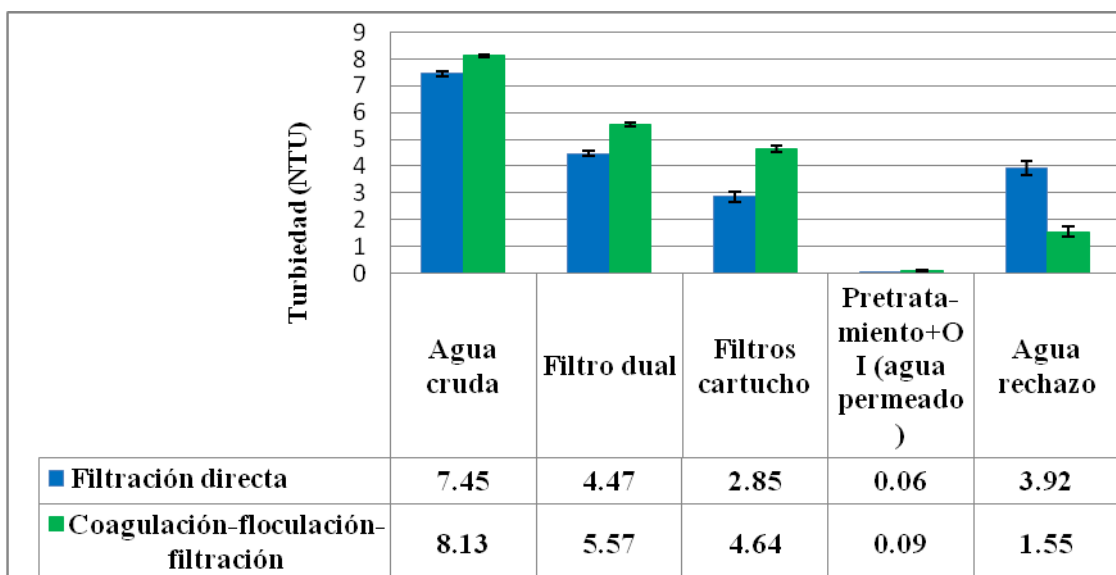


Figura 3. 29. Comparación de los valores de turbiedad del agua en diferentes etapas de la planta piloto de desalación por OI y aplicando los dos tipos de pretratamientos preseleccionados.

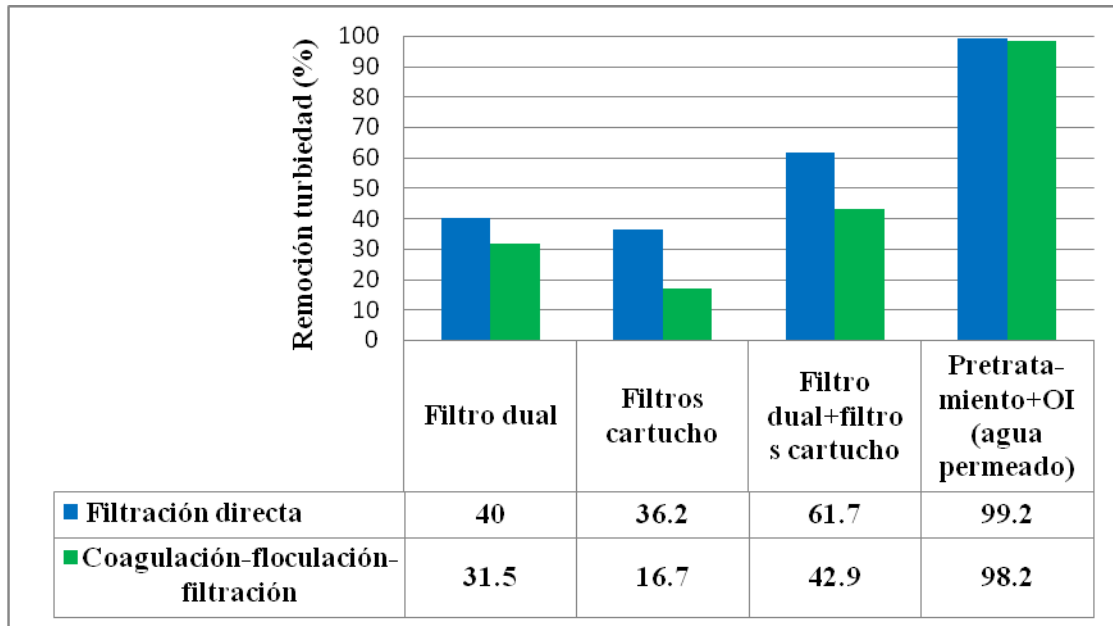


Figura 3. 30. Comparación de los porcentajes de remoción de turbiedad del agua en diferentes etapas de la planta piloto de desalación por OI y aplicando los dos tipos de pretratamientos preseleccionados.

Las figuras 3.29 y 3.30 determinaron que el pretratamiento de filtración directa resulta más eficiente en cada etapa del proceso aplicado en planta piloto de ósmosis inversa para la remoción de turbiedad en agua de mar sintética; obteniendo mayores porcentajes de remoción por etapa del proceso que el pretratamiento coagulación-floculación-filtración.

La figura 3.31 presenta los valores de color por etapa del proceso para cada pretratamiento y la figura 3.32 presenta la comparación de los porcentajes de remoción del color por etapa del proceso para cada pretratamiento aplicado en planta piloto de ósmosis inversa.

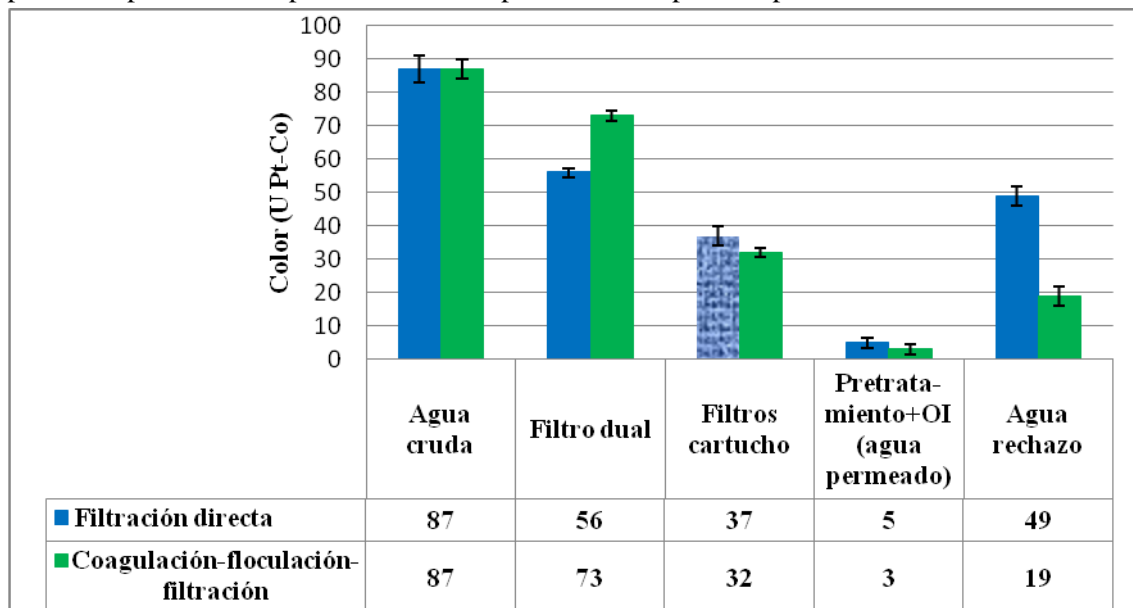


Figura 3. 31. Comparación de los valores de color del agua en diferentes etapas de la planta piloto de desalación por OI y aplicando los dos tipos de pretratamientos preseleccionados.

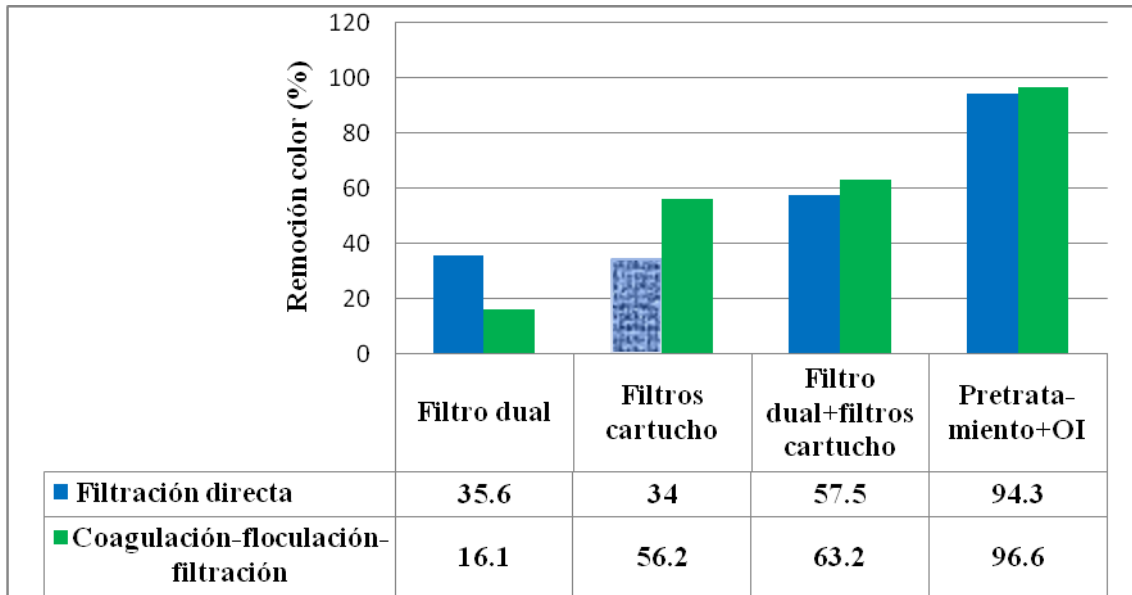


Figura 3. 32. Comparación de los porcentajes de remoción de color del agua en diferentes etapas de la planta piloto de desalación por OI y aplicando los dos tipos de pretratamientos preseleccionados.

La figuras 3.31 y 3.32 muestran que el pretratamiento coagulación-floculación-filtración permitió obtener respectivamente mejores valores residuales de color y mayores porcentajes de remoción de color en todas las etapas de este pretratamiento, excepto en la del filtro dual. Cabe destacar que, los porcentajes de remoción presentados en la figura 3.32 son valores promedios, con excepción del pretratamiento filtración directa en el que solamente se reporta el mejor valor de remoción para filtros cartucho (34%) obtenido al inicio del proceso; en efecto, conforme el sistema opera se observó un aumento muy significativo del valor residual de este parámetro.

La figura 3.33 presenta la comparación del parámetro pH para cada pretratamiento aplicado en planta piloto.

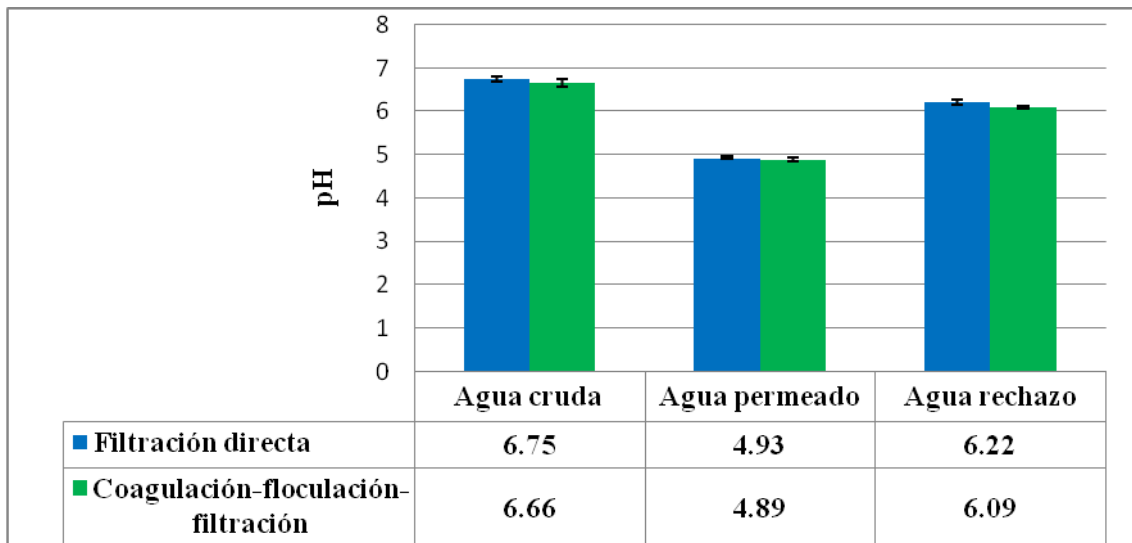


Figura 3. 33. Comparación del pH del agua en diferentes etapas de la planta piloto de desalación por OI y aplicando los dos tipos de pretratamientos preseleccionados.

En la figura 3.33 se muestra que el valor de pH fue similar para ambos pretratamientos aplicados en planta piloto de OI; no teniendo influencia significativa dicho parámetro en el proceso.

La figura 3.34 presenta el tiempo de operación máximo de la planta piloto debido a la diferencia de presión en filtros para ambos pretratamientos preseleccionados aplicados en planta piloto.

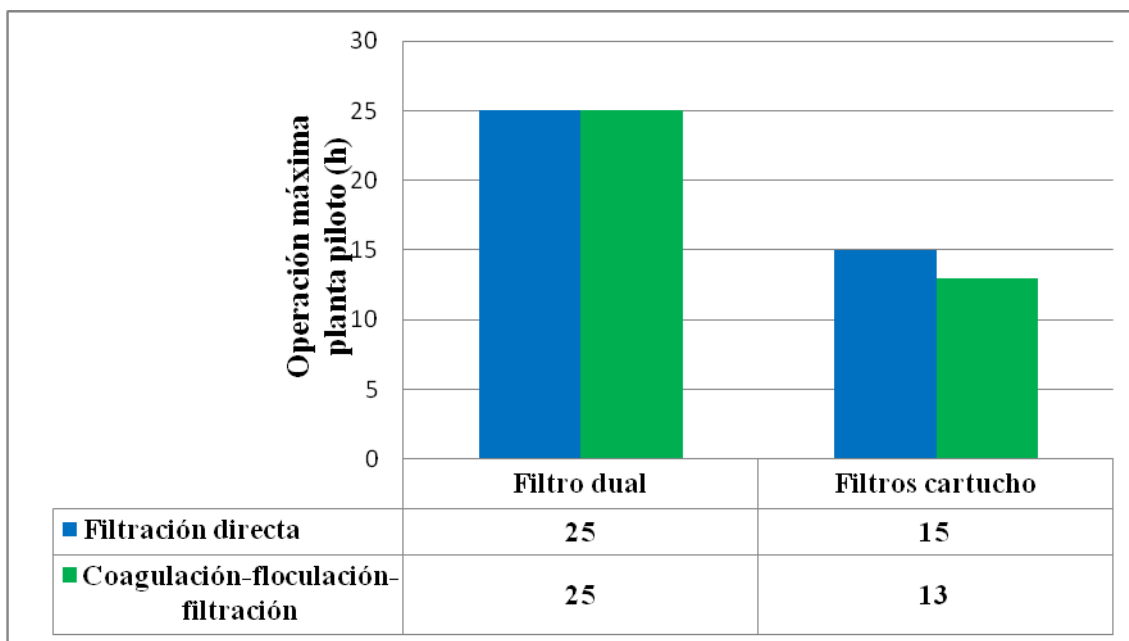


Figura 3. 34. Tiempo de operación máximo de la planta piloto de desalación por OI por vida útil de filtros cartucho aplicando los dos tipos de pretratamientos preseleccionados.

Con base en lo reportado en las figuras 3.14 y 3.23, la figura 3.34 muestra el tiempo máximo de operación de la planta piloto para cada pretratamiento preseleccionado; ya que con la diferencia de presión de filtros se obtuvo el tiempo máximo de operación de dicha planta recordando que la presión mínima de operación de la bomba de alta presión (22 psi) es la limitante para la operación del proceso de OI.

Debido a lo anterior, se obtuvo que para el pretratamiento filtración directa, el tiempo máximo de operación de la planta fue de 15 horas; mientras que para el pretratamiento coagulación-floculación-filtración el tiempo máximo de operación fue de aproximadamente 13 horas, estos tiempos fueron establecidos por los filtros cartucho que son los que se saturan a menor tiempo. Debido a lo anterior, se concluyó que existe una diferencia en tiempo máximo de operación de alrededor de 2 horas entre pretratamientos aplicados.

La figura 3.35 presenta la comparación del caudal para los tres tipos de agua con respecto al pretratamiento preseleccionado aplicado.

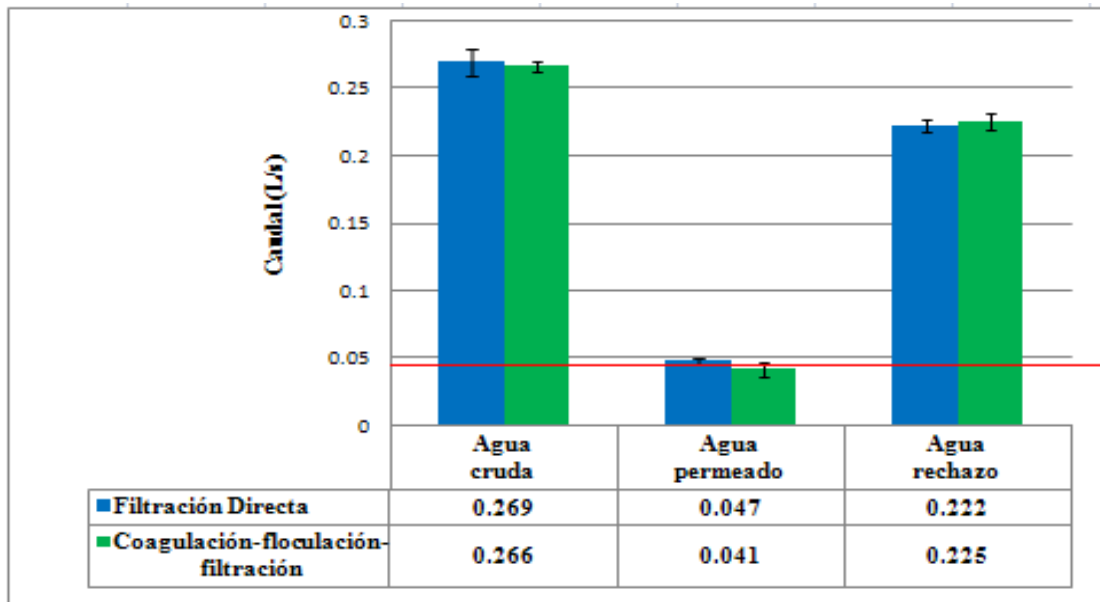


Figura 3. 35. Comparación del caudal medido en la planta piloto de desalación por OI aplicando los dos tipos de pretratamientos preseleccionados.

La figura 3.35 muestra que los caudales obtenidos para ambos pretratamientos fueron muy similares a través del tiempo de operación empleado; para el caso del caudal de permeado, ambos pretratamientos operaron casi de manera uniforme al caudal de diseño de la planta (0.044 L/s); es decir, para filtración directa operó a un 7.43% por arriba del caudal de diseño y para coagulación-floculación-filtración operó a un 6.3% por debajo del caudal de diseño, no siendo significativa la diferencia para ambos pretratamientos.

La figura 3.36 presenta la comparación del porcentaje de recuperación para cada pretratamiento preseleccionado aplicado en la planta piloto de desalación por OI.

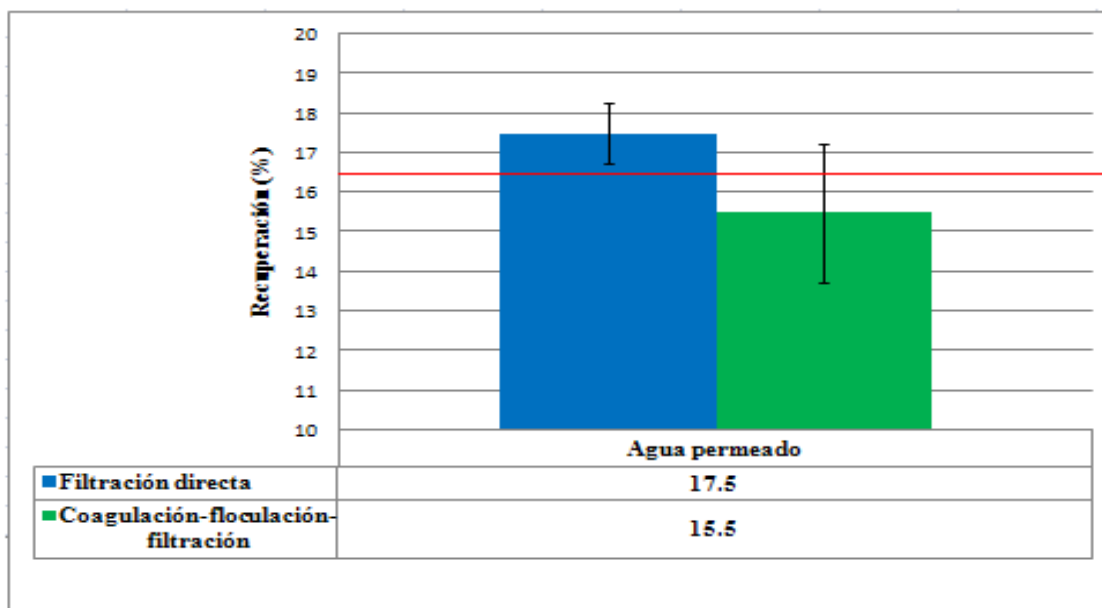


Figura 3. 36. Comparación del porcentaje de recuperación en el proceso de OI para los dos tipos de pretratamientos preseleccionados aplicados en planta piloto.

La figura 3.36 muestra que ambos pretratamientos preseleccionados aplicados en planta piloto operaron con valores de recuperación muy cercanos al de diseño (16.5%), es decir, 1% por arriba de esa cifra para el pretratamiento filtración directa y 1% por debajo de ese dato de diseño para el pretratamiento de coagulación-floculación-filtración; no siendo significativa la diferencia entre los pretratamientos aplicados para la determinación del mejor pretratamiento con base en este parámetro.

La figura 3.37 presenta la comparación del parámetro conductividad eléctrica para los tres tipos de agua en cada pretratamiento aplicado en planta piloto.

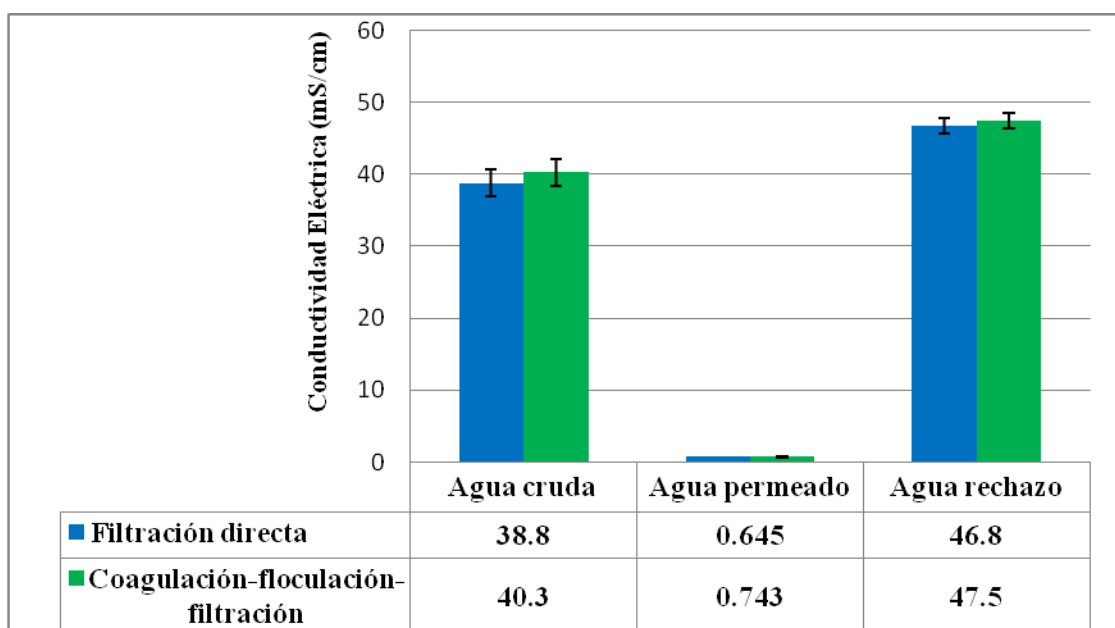


Figura 3. 37. Comparación de la conductividad eléctrica del agua de mar cruda, permeado y rechazo de planta piloto de desalación por OI y aplicando los dos tipos de pretratamientos preseleccionados.

En la figura 3.37 se observó que el comportamiento de la conductividad eléctrica fue similar aplicando ambos pretratamientos para el permeado y el rechazo del proceso de OI en la planta piloto; destacando principalmente que para el pretratamiento de filtración directa se obtuvo una remoción de la conductividad eléctrica de 98.3%; mientras que, para el pretratamiento de coagulación-floculación-filtración se obtuvo un porcentaje de remoción de 98.2%.

Cabe señalar que, el aumento de la conductividad eléctrica en el agua de rechazo con respecto al agua de mar cruda para pretratamientos filtración directa y coagulación-floculación-filtración fue de 20.6% y 17.87% respectivamente; el aumento en la conductividad eléctrica del agua de rechazo es debido al rechazo de sales por las membranas del proceso de OI y concentradas en dicha agua.

Con base en los resultados analizados anteriormente se concluyó de manera general que el mejor pretratamiento aplicado en planta piloto de ósmosis inversa es la **coagulación-floculación-filtración** debido principalmente a que se remueve de manera más eficiente el IDE, obteniendo un valor de IDE₁₅ de agua pretratada menor al valor máximo recomendado por proveedores de membranas para proceso de ósmosis inversa.

Cabe destacar que otro factor importante fue la diferencia de presión en filtros, ya que de esta forma se obtuvo el tiempo máximo de operación en planta piloto para cada pretratamiento debido a la limitante que es la presión mínima de operación de la bomba de alta presión (22 psi); siendo que el pretratamiento filtración directa operó dos horas más que el pretratamiento coagulación-floculación-filtración en planta piloto de desalación por OI.

Con respecto a los parámetros turbiedad y color se obtuvieron mejores resultados de remoción en filtración directa y coagulación-floculación-filtración respectivamente. Con la aplicación del proceso en general (pretratamiento + OI + post-tratamiento) se obtuvieron resultados altamente aceptables cumpliendo de esta forma con lo establecido por dichos parámetros en la NOM-127-SSA1-1994.

Para el caso del caudal, porcentaje de recuperación, pH y conductividad eléctrica no existió diferencia significativa entre pretratamientos, es decir, el comportamiento de estos parámetros fue similar para los dos pretratamientos a través del tiempo de operación de la planta piloto de ósmosis inversa; no teniendo influencia significativa para la determinación del mejor pretratamiento aplicado en planta piloto de desalación.

3.6. Determinación del pretratamiento más económico de los dos determinados con base en una estimación de costos de reactivos y materiales

La estimación de costos se basó tomando un tiempo de operación para cada pretratamiento aplicado en planta piloto de 13 horas.

La tabla 3.5 presenta la estimación de costos para el pretratamiento de filtración directa aplicado en la planta piloto de desalación por OI.

La tabla 3.6 presenta la estimación de costos para el pretratamiento de coagulación-floculación-filtración aplicado en la planta piloto de desalación por OI.

Cabe destacar que, los costos de energía eléctrica incluyen a la bomba de alimentación de agua de mar cruda, la bomba de alta presión y las bombas dosificadoras empleadas en cada pretratamiento y post-tratamiento por corrida.

Finalmente, la tabla 3.7 presenta la comparación de la estimación de costos de ambos pretratamientos y un post-tratamiento aplicados en planta piloto de desalación por OI.

Tabla 3. 5. Estimación de costos para el pretratamiento de filtración directa aplicado en la planta piloto de desalación por OI

PRETRATAMIENTO: FILTRACIÓN DIRECTA									
Concepto	Etapa del pretratamiento					Etapa del post-tratamiento		Energía eléctrica	Total
	Ajuste pH (H ₂ SO ₄)	Desinfección (NaOCl)	Coagulante	Filtros cartucho	Declaración (NaHSO ₃)	Ajuste pH (Ca(OH) ₂)	Post-cloración (NaOCl)		
Agua a tratar (m ³ /corrida)	12.4	12.4	----	12.4	12.4	2.05	2.05	12.4	
[solución del reactivo]	0.1N	1,000 mg/L	----	----	3,000 mg/L	250 mg/L	1,000 mg/L	----	
Dosis de reactivo	7 mL/L	1.5 mg/L	----	1.5 pz/corrida	0.5 mg/L	10 mL/L	0.5 mg/L	----	
Costo reactivo o insumo	\$36.8/L	\$6.4/L	----	\$210/pz	\$67.2/kg	\$2.6/kg	\$6.4/L	\$1.3/KW	
Costo de reactivo o insumo por corrida	\$9.24	\$2.38	----	\$315	\$1.88	\$0.014	\$0.131	\$58.9	\$387.55

Tabla 3. 6. Estimación de costos para el pretratamiento de coagulación-floculación-filtración aplicado en la planta piloto de desalación por OI

PRETRATAMIENTO: COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-FILTRACIÓN									
Concepto	Etapa del pretratamiento					Etapa del post-tratamiento		Energía eléctrica	Total
	Ajuste pH (H ₂ SO ₄)	Desinfección (NaOCl)	Coagulante	Filtros cartucho	Declaración (NaHSO ₃)	Ajuste pH (Ca(OH) ₂)	Post-cloración (NaOCl)		
Agua a tratar (m ³ /corrida)	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	2.05	2.05	12.4	
[solución del reactivo]	0.1N	1,000 mg/L	1,000 mg/L	----	3,000 mg/L	250 mg/L	1,000 mg/L	----	
Dosis de reactivo	7 mL/L	1.5 mg/L	8.5 mg/L	1.5 pz/corrida	0.5 mg/L	10 mL/L	0.5 mg/L	----	
Costo reactivo o insumo	\$36.8/L	\$6.4/L	\$1.95/kg	\$210/pz	\$67.2/kg	\$2.6/kg	\$6.4/L	\$1.3/KW	
Costo de reactivo o insumo por corrida	\$9.24	\$2.38	\$0.205	\$315	\$1.88	\$0.014	\$0.131	\$58.9	\$387.75

Tabla 3. 7. Comparación de estimación de costos para los dos tipos de pretratamientos aplicados en planta piloto de desalación por OI.

Pretrata- miento	Agua a tratar (m ³ /corrida)	Agua tratada (permeado) (m ³ /corrida)	% recuperación de agua tratada	Costo total/corrida (pesos)	Costo total/m ³ agua a tratar (pesos)	Costo total/m ³ agua permeado (pesos)
Filtración directa	12.4	2.05	16.53	387.55	31.25	189.05
Coagulación -floculación- filtración	12.4	2.05	16.53	387.75	31.27	189.15

Con base en el análisis realizado a las tablas 3.5, 3.6 y 3.7 se determinó lo siguiente:

- La diferencia en el costo total entre ambos pretratamientos fue 0.2 pesos; siendo ambos muy similares para los dos pretratamientos aplicados en planta piloto de desalación por ósmosis inversa.
- El costo total para cada pretratamiento es alto debido principalmente al costo de filtros cartucho, que representa aproximadamente el 81% del costo total, para época vacacional o de mayor contaminación.

Debido a lo anterior, se concluyó de manera general que la diferencia en el costo para ambos pretratamientos aplicados en planta piloto de desalación por ósmosis inversa no es significativa; siendo ligeramente más económico el pretratamiento de filtración directa en planta piloto de desalación por ósmosis inversa.

La tabla 3.8 presenta una comparación de costos del pretratamiento más económico obtenido en este estudio (coagulación-floculación-filtración) con respecto a los costos reportados en literatura empleando el proceso de ósmosis inversa.

Tabla 3. 8. Comparación de costos del mejor pretratamiento obtenido en este estudio con los costos reportados para proceso de ósmosis inversa a nivel mundial

Proceso	Capacidad de la planta (m³/día)	Costo producción total (pesos/m³)	Costos de operación (pesos/m³)	Referencia
Ósmosis inversa	23	----	189.05	Este estudio
Ósmosis inversa con energía no convencional	2-24	14.95-243.75	7.03-114.56	Karagiannis <i>et al.</i> , 2008
Ósmosis inversa	100	22.75	10.7	Fuentes <i>et al.</i> , 2003

La tabla 3.8 muestra que a menor capacidad de tratamiento de agua de la planta mayor es el costo de producción total; cabe destacar que, según lo reportado en literatura, los costos de operación representan el 47% del costo de producción total. Los costos de operación incluyen los costos de energía eléctrica, químicos y cartuchos; siendo únicamente los costos calculados para este estudio.

Por lo anterior, se concluyó que el costo obtenido en este estudio fue mayor a los costos reportados en literatura; esto debido principalmente al consumo de filtros cartucho, mayor contaminación en el agua de mar por época vacacional y la baja capacidad de la planta piloto empleada en este estudio.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Con base en los resultados presentados anteriormente en este estudio, se concluye que el mejor pretratamiento para la planta piloto de desalación de un agua de mar por ósmosis inversa fue el basado en **coagulación-floculación-filtración**, en comparación al pretratamiento de filtración directa. Lo anterior se concluyó debido a que el pretratamiento basado en coagulación-floculación-filtración como procesos principales fue más eficiente para disminuir los valores de IDE y color de un agua de mar preparada y alimentada a una planta piloto desalación por OI.

De manera adicional en este estudio:

- Se preseleccionaron como los dos tipos de pretratamiento de agua de mar (coagulación-floculación-filtración y filtración directa) más eficientes y aplicados a nivel mundial, con base en la información de reportes publicados. Estos pretratamientos permiten obtener un efluente de calidad adecuada y costo aceptable para ser tratado por el proceso de ósmosis inversa para desalación.
- Se determinaron los mejores reactivos y dosis a aplicar, a nivel de laboratorio y planta piloto, para el tren de pretratamiento de coagulación-floculación-filtración: ajuste de pH a agua cruda (H_2SO_4 [0.1 N] = 7 mL/L), precloración (NaOCl [1,000 mg/L] = 1.5 mg/L), el mejor coagulante determinado de los tres evaluados ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ [1,000 mg/L] = 8.5 mg/L) y decoloración (NaHSO_3 [3,000 mg/L] = 0.5 mg/L).
- Se determinaron a nivel de laboratorio los reactivos y mejores dosis para el post-tratamiento del agua producto o permeado: ajuste de pH a agua permeado ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ [250 mg/L] = 10 mL/L) y post-cloración (NaOCl [1,000 mg/L] = 0.5 mg/L).
- Se diseñó e instaló una planta piloto de desalación de agua de mar por ósmosis inversa que además, contó con los pretratamientos preseleccionados para su operación, y que permitió obtener un efluente que cumple con los valores de turbiedad (5 NTU) y color (20 U Pt-Co) de la NOM-127-SSA1-1994 y un porcentaje de permeado superior (1%) al de diseño.
- La estimación de costos de reactivos y materiales para la época vacacional de los dos pretratamientos evaluados permitió determinar que la diferencia económica entre ambos pretratamientos no fue significativa, debido al bajo costo del coagulante empleado ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) en este estudio.

Recomendaciones

- Realizar las pruebas con agua de mar a nivel de planta piloto con ambos pretratamientos con la finalidad de evaluar si existe diferencia significativa con las pruebas realizadas con agua sintética.
- Realizar un estudio económico para determinar la viabilidad de los dos trenes de pretratamiento.

REFERENCIAS

- Abdessemed, D.; Nezzal, G., (2008). Coupling softening-ultrafiltration like pretreatment of seawater case study of the Corso plant desalination (Algiers). *Desalination* 221, pp. 107-113.
- Aboabboud, M.; Elmasallati, S., (2007). Potable water production from seawater by the reverse osmosis technique in Libya. *Desalination* 203, pp. 119-133.
- Agriculture, Fisheries & Forestry-Australia, (2002). Economic and technical assessment of desalination technologies in Australia: with particular reference to national action plan priority regions. C/Land & Water Australia, level 2, UNISYS Building 91 Northbourne Avenue.
- American Public Health Association (APHA) (2005). *Electrometric Standard Methods 4500 H+B APHA-AWWA_WEF 20th edición.*
- American Public Health Association (APHA) (2005). *Conductimetric Standard Methods 2510B APHA-AWWA_WEF 20th edición.*
- American Public Health Association (APHA) (1995). *Nefelometric Standard Methods 2130B APHA-AWWA_WEF 20th edición.*
- American Society for Testing and Materials (ASTM), (1995). *Silt Density Index (SDI); ASTM Standard D4189, the American Standard for Testing Material.*
- American Society for Testing and Materials (ASTM), (1999). *ASTM D2035-80 Standard practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water.*
- AWWA, (2004). Water desalting, planning guide for water utilities. American Water Works Association. Wiley & sons. United States of America. pp. 198.
- Bartels, C.; Franks, R.; Rybar, S.; Schierach, M.; Wilf, M., (2005). The effect of feed ionic strength on salt passage through reverse osmosis membranes. *Desalination* 184, pp. 185-195.
- Bonnelye, V.; Sanz, M. A.; Durand, J.; Plasse, L.; Gueguen, F.; Mazounie, P., (2004). Reverse osmosis on open intake seawater: pre-treatment strategy. *Desalination* 167, pp. 191-200.
- Brehant, A.; Bonnelye, V.; Perez, M., (2002). Comparison of MF/UF pretreatment with conventional filtration prior to RO membranes for surface seawater desalination. *Desalination* 144, pp. 353-360.
- Cerón, O, (2006). Aplicación de lodos de plantas potabilizadoras en materiales cementantes para elaborar productos de la construcción. Tesis de Licenciatura UNAM.
- Chua, K. T.; Hawlader, M. N. A.; Malek, A., (2003). Pretreatment of seawater: Results of pilot trials in Singapore. *Desalination* 159, pp. 225-243.
- Clunie, W.; VandeVenter, L.; Williams, S.; Garana, E., (2005). Comparison of pre-treatment alternatives for seawater reverse osmosis, Proc. AWWA Membrane Technology Conference, Phoenix, USA, March 6-9.

Department of Resource Development (DRD), (1999). *Western Australian Industrial Minerals Review*. Government of Western Australia, Perth.

Desalination markets 2005–2015, a global assessment & forecast, Global Water Intelligence (GWI), (2005).

Ebrahim, S.; Abdel-Jawad, M.; Bou-Hamad, S.; Safar, M., (2001). Fifteen years of R&D program in seawater desalination at KISR part I. pretreatment technologies for RO systems. *Desalination* 135, pp. 141-153.

Elguera, A. M. and Báez, S. O. P., (2005). Development of the most adequate pre-treatment for high capacity seawater desalination plants with open intake. *Desalination* 184, p.p. 173-183.

El-Ramly, N. and Peterson, E., (1999). American Desalting Plants: Membrane Desalting Plants on the web, University of Hawaii. Available From: http://www.sciencedirect.com/science?_ob=RedirectURL&_method=externObjLink&_locator=url&_cdi=5831&_plusSign=%2B&_targetURL=http%253A%252F%252Fwww2.hawaii.edu%252F%25257Enabil%252Fdepow.htm (accessed 13.02.08.).

Empresa Mixta de Aguas de Las Palmas (emalsa), (2007). Curso de ósmosis inversa. <http://www.scribd.com/doc/9584879/Curso-desalacion>.

Filtros y Mallas de Puebla (FMP), (2009). Filtración de líquidos. www.fmp.com.mx/filtracionliquido.html

Fritzmann, C.; Lowenberg, J.; Wintgens, T.; Melin, T., (2007). “State-of-the-art of reverse osmosis desalination”. *Desalination* 216 (2007) 1-76.

Fuentes, 2007. Gaceta del IMTA: Desalación de agua de mar. Número 6, Octubre de 2007. <http://www.imta.gob.mx/gaceta/anteriores/g06-10-2007/desalacion.html>

Fuentes y Ramírez, 2003. Desalación del Agua: Una Alternativa para Resolver la Demanda de Agua Potable en el Sur de la República Mexicana. *Revista Agua Latinoamericana*, Septiembre/Octubre, pp.6.

Glueckstern, P.; Priel, M.; Wilf, M., (2002). Field evaluation of capillary UF technology as a pretreatment for large seawater RO systems. *Desalination* 147, pp. 55-62.

Hydranautics, (2003). Hydranautics, Chemical Pretreatment for RO and NF Technical Application Bulletin No. 111.

Interlabco LTDA (Laboratorio Químico Internacional), (2009). Análisis de materiales filtrantes. www.interlabco.com/serv_analisisMatFiltrantes.htm

International Desalting Association (IDA), (2006). Worldwide Desalting Plants Inventory 19th. IDA.

Karagiannis, I.; Soldatos, P., (2008). Water desalination cost literatura: review and assessment. *Desalination* 223, pp. 448-456.

Khawaji, A. D.; Kutubkhanah, I. K.; Wie, J., (2007). A 13.3 MGD seawater RO desalination plant for Yanbu industrial city. *Desalination* 203, pp. 176-188.

Kelle, Peter R., (1976). *Membrane technology and Industrial separation techniques*. Noyes Data Corporation. 1976.

Kim, S. y Hoek, E. M. V., (2005). Modeling concentration polarization in reverse osmosis processes. *Desalination* 186, pp. 111-128.

Koutsakos, E.; Moxey, D., (2007). Membrane management system. *Desalination* 203, pp. 307-311.

Lambe, T. W. and Whitman, R. V., (2007). *Mecánica de suelos*. Perú, México.

Lenntech Water Treatment, (2008). Tratamiento del agua. <http://www.lenntech.com/espanol/Desalacion/desalacion.htm>

Leparc, J.; Rapenne, S.; Courties, C.; Lebaron, P., (2007). Water quality and performance evaluation at seawater reverse osmosis plants through the use of advanced analytical tools. *Desalination* 203, pp. 243-255.

Lonsdale, H. y Podal, H. E., (1972). *Reverse Osmosis Membrane Research*. New York.

Lynn, E., (1986). Posttreatment of reverse osmosis product waters. *Applegate. Journal AWWA*.

Matrix, (2007). Matrix a Division of AQUACHEM. <http://www.matrix-utilities.com/>

Medina, J. A., (2000). "Desalación de aguas salobres y de mar". Ed. Mundi-Prensa. 2000.

Mickley, M. (2001). Membrane concentrate disposal: practices and regulations. US Bureau of reclamation. *Desalination and purification research development program, report No. 69*. Denver, Colorado.

Morenski, F., (1992). Current pretreatment requirements for reverse osmosis membrane applications. In: *Official Proceedings of the 53rd International Water conference*, p.p. 325-330.

NOM-127-SSA1-1994. "Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Pais, J.; Ferreira, L. M., (2007). Performance study of an industrial RO plant for seawater desalination. *Desalination* 208, pp. 269-276.

Petry, M.; Sanz, M. A.; Langlais, C.; Bonnelye, V.; Durand, J.; Guevara, D.; Mantovani, W.; Homma, C., (2007). The Coloso (Chile) reverse osmosis plant. *Desalination* 203, pp. 141-152.

Piqué, G. G., (1989). *Manual Práctico de Ósmosis Inversa*. UOP Fluid Systems.

Porteous, A., (1975). *Saline water desalination processes*. Applied Science.

Rahardianto, A.; Shih, W.; Lee, R.; Cohen, Y., (2006). Diagnostic characterization of gypsum scale formation and control in RO membrane desalination of brackish water. *Journal of Membrane Science* 279, p.p. 655-668.

- Rautenbach, R. and Merlin, T., *Mebranverfahren (Grundlagen der Modul-und Anlagenauslegung)*. 2nd ed., (2003).
- Reverter, J. A.; Talo, S.; Alday, J., (2001). The success story of brine staging. *Desalination* 138, p.p. 207-217.
- Sauvet-Goichon B., (2007). Ashkelon desalination plant-A successful challenge. *Desalination* 203, issues 1-3, pp. 75-81.
- Sherwood Design Engineers, (2006). Los retos para la gestión del agua en la región de Loreto. Estudio presentado a la International Community Foundation. Baja California, México.
- Squire, D.; Murner, J.; Holden, P.; Fitzpatrick, C., (1996). Disposal of reverse osmosis membrane concentrate. *Desalination* 71, pp. 165-175.
- U.S. Department of the Interior, (2003). *Desalting handbook for planners*. Desalination Research and Development Program Report No. 72: Third Edition. Tampa, Florida. pp. 310.
- Van Hoof, S. C. J. M.; Minnery, J. G.; Mack, B., (2001). Dead-end ultrafiltration as alternative pre-treatment to reverse osmosis in seawater desalination: a case study. *Desalination* 139, pp. 161-168.
- Vial, D.; Doussau, G., (2002). The use of microfiltration membranes for seawater pre-treatment prior to reverse osmosis membranes. *Desalination* 153, pp. 141-147.
- Wangnick, K., (2002). 2002 IDA Worldwide Desalting Plants Inventory, Report 17. Germany: Wangnick Consulting GMBH.
- White, G. C., (1978). *Handbook of Chlorination*. New York, N. Y. Van Nostrand Reinhold.
- Wilf, M.; Klinko, K., (1998). Effective new pretreatment for seawater reverse osmosis systems. *Desalination* 117, pp. 323-331.
- Wilf, M.; Klinko, K., (2001). Optimization of seawater RO systems design. *Desalination* 138, p.p. 299-306.
- Wolf, P. H.; Siverns, S.; Monti, S., (2005). UF membranes for RO desalination pretreatment. *Desalination* 182, pp. 293-300.
- Wolff, G., (2006). The economics of desalination. Pacific Institute. Available from: <http://texas.sierraclub.org/water/conference/SAWconfPPTs/garyWolff.pdf> (accessed 13.02.08).
- Xu, J.; Ruan, G.; Gau, X.; Pan, X.; Su, B.; Gao, C., (2008). "Pilot study of inside-out and outside-in hollow fiber UF modules as direct pretreatment of seawater at low temperature for reverse osmosis". *Desalination* 219 (2008) 179-189.
- Zhang, J. D.; Liu, Y. W.; Gao, S. M.; Li, C. Z.; Zhang, F.; Zen, H. M.; Ye, C. S., (2006). Pilot testing of outside-in UF pretreatment prior to RO for high turbidity seawater desalination. *Desalination* 189, pp. 269-277.
- Zhou, Y. y Tol, R. S. J., (2005). Evaluating the costs of desalination and water transport. *Water Resources Research* 41 (3), 1-10.

ANEXOS

Anexo A. Elementos contenidos en el agua de mar, su origen o las causas que provocan su presencia en el agua y efectos

✓ **Sodio**

Metal alcalino más frecuente en la composición de las aguas y es el único presente en cantidades significativas en las aguas naturales. Todos los compuestos sódicos son solubles; por lo que, el sodio de suelos y lavado de rocas siempre está en solución, esto significa que los compuestos de sodio no precipitan sobre las membranas.

El ión metálico sodio es el más abundante y con mucha diferencia en el agua de mar, en concentraciones de alrededor de 10,000 mg/L. El sodio se encuentra en forma de cloruro, carbonato o bicarbonato sódico.

No contribuye a la dureza del agua; sin embargo, las aguas subterráneas contienen carbonato y bicarbonato sódico en cantidades considerables siendo alcalinas y pueden tener pH de 9 o mayor. El actual reglamento sanitario fija el contenido máximo de sodio en 150 mg/L.

✓ **Calcio y magnesio**

Se localizan en todas las aguas y principalmente abundantes en las aguas subterráneas; son parte de numerosas sales, por lo que, su influencia en las características depende del tipo de sales en las cuales están presentes.

Conjuntamente son los contribuyentes al establecimiento de la *dureza* del agua, que es causada por las sales que forman estos dos elementos con los bicarbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos. Por lo que, ambos son causantes en gran medida de las incrustaciones cuando el agua experimenta cambios en la temperatura, pH y presión.

El desarrollo de precipitaciones se forma cuando se rebasan los límites de solubilidad de las citadas sales, rompiendo el equilibrio de la solución y dando lugar a la formación de carbonatos insolubles de estos metales y en ocasiones de sus sulfatos.

El contenido máximo de magnesio de un agua destinada al consumo humano no debe sobrepasar los 50 mg/L, pero para el calcio no existe límite alguno en la Reglamentación Técnico Sanitaria. El calcio es necesario para el organismo, siendo la necesidad diaria de 800 mg/L por persona y día. Como no es un elemento tóxico no existen límites claros, aunque a niveles de 1,000 mg/L se han encontrado problemas.

✓ **Cloro**

Elemento más abundante en el agua de mar, alcanzando concentraciones medias de unos 20,000 mg/L. Aunque algunas teorías sostienen que proviene del ácido clorhídrico o de sales volátiles de cloro de procedencia de erupciones volcánicas, aguas termales y magmáticas, su origen es difícil de explicar.

En aguas subterráneas de regiones húmedas el contenido de cloro suele ser bajo, inferior a 5 mg/L, al menos que no haya sido contaminada con agua de mar. Los niveles de cloro en un agua deseable, son bastante variables en función del destino final que se aplique a la misma; en

general, valores de aproximadamente 150 mg/L son considerados adecuados para la mayor parte de usos.

Al igual que en el caso del sodio hay limitaciones al contenido máximo de este elemento por la Reglamentación Sanitaria que no debe ser superior a 250 mg/L. Para uso agrícola, el cloro produce quemaduras en las hojas de las plantas; por lo que, los niveles tolerables son distintos según los sistemas de riego que moje o no las hojas. 100 mg/L es un valor excesivo para el primer caso mientras que el segundo puede llegar hasta 350 mg/L.

✓ **Sulfatos**

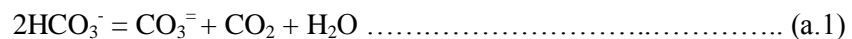
El sulfato sódico y magnésico son los más frecuentes ya que provienen del yeso o anhidrita; contribuyen a la salinidad de las aguas. El contenido de sulfatos no debe sobrepasar los 250 mg/L desde el punto de vista sanitario, concentraciones superiores a 1.2 g/L se consideran negativas.

El principal problema de los sulfatos para desalación con ósmosis inversa es la posibilidad de formar precipitados de calcio y magnesio sobre las membranas cuando se rebasan ciertos niveles; por lo que, se debe tener vigilancia.

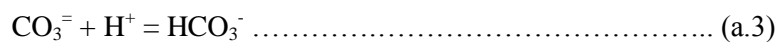
✓ **Carbonatos y bicarbonatos**

Se encuentran en todas las aguas y en ocasiones en concentraciones muy elevadas debido a su relación con el calcio y magnesio antes mencionado. Como las membranas de ósmosis inversa tienen un elevado rechazo de estos iones, se concentran en el rechazo y pueden precipitar.

El agua de mar contiene iones bicarbonato que están en equilibrio con iones carbonato e hidroxilo como se presenta en las ecuaciones de las reacciones a.1 y a.2.



Debido al elevado pH o alta temperatura se desplaza el equilibrio hacia la producción de iones carbonato e hidroxilo y cuando esto sucede, precipitan el calcio y/o el magnesio en forma de hidróxidos. Para evitar esto se trata el agua con ácido para mantener la reacción de equilibrio hacia la izquierda y con más ácido para eliminar los bicarbonatos, como se presenta en las ecuaciones de las reacciones a.3 y a.4.



Con la acidificación del agua debe tenerse cuidado para evitar la formación de sulfato cálcico, que no es afectado por el tratamiento ácido.

Un aspecto importante a considerar desde el punto de vista de la ósmosis inversa es lo que se conoce como efecto del ión común, que no es otra cosa que el cambio de la solubilidad de una sal como consecuencia de la presencia en la solución de otras sales que no tienen iones comunes a ella y que se encuentran en altas concentraciones. Este efecto es empleado en el ablandamiento o suavización de aguas.

Los pertenecientes al segundo grupo están:

✓ **Nitratos**

La variación del contenido de nitratos en el agua es alta y en muchas aguas subterráneas no tienen relación con ninguna formación biológica. Los nitratos del agua proceden de diferentes fuentes como son plantas leguminosas, de residuos de animales y plantas, de fertilizantes agregados al suelo. Entre otros, de las propias aguas residuales.

Contenido alto de nitratos puede indicar contaminación y ser considerado como un indicador y un aviso para comprobar la presencia de bacterias peligrosas, esto debe ser tomado en cuenta. En aguas para usos domésticos, los nitratos en concentraciones mayores de 45 mg/L son indeseables por posible efecto tóxico en niños, conocido como cianosis.

Los nitratos no se eliminan del agua por ebullición, debiendo recurrir a la desmineralización o la separación por membranas.

✓ **Hierro**

Todas las aguas contienen hierro en mayor o menor cantidad y puede ser problemático para determinados usos ya sea doméstico o industrial. El contenido de 0.5 mg/L en agua son perjudiciales.

Hay dos tipos de iones de hierro, el ferroso y el férrico. El primero es inestable en presencia de aire y cambia al estado férrico; mientras que el segundo puede ser disuelto en cantidades hasta de 50 mg/L en aguas casi neutras o ligeramente ácidas; en contraste, el ión férrico es casi completamente insoluble en aguas alcalinas.

En aguas subterráneas las concentraciones entre 1 a 5 mg/L son normales, puede procederse a la aireación del agua para la eliminación del hierro, con la cual se consigue bajar dicho contenido hasta 0.1 mg/L; con el hierro y los carbonatos forman precipitados sobre las membranas, esto reduce la eficiencia de la instalación aunque se eliminan fácilmente.

✓ **Manganeso**

El comportamiento químico del manganeso es similar al del hierro y se presenta en las mismas condiciones que éste. Se encuentra como bicarbonato manganeso soluble que cambia cuando reacciona con el oxígeno del aire a hidróxido de manganeso insoluble.

Cuando los iones Fe^{3+} y Mn^{2+} aparecen simultáneamente en el agua, el primero puede catalizar la oxidación del segundo; por lo que, es conveniente utilizar anti-incrustantes. Cuando se producen precipitados de hierro y manganeso sobre las membranas, se obtienen buenos resultados en su limpieza bajando el pH por debajo de 3 aplicando ácido cítrico y acético.

✓ **Sílice**

El silicio es junto con el oxígeno el elemento más abundante en la corteza terrestre, su combinación forma el SiO_2 que se conoce como sílice. En algunas aguas subterráneas se puede encontrar en cantidades de hasta 100 mg/L y contenidos de 20 mg/L son muy normales.

Forma parte importante en las incrustaciones formadas por muchas aguas, pero no contribuye a la dureza del agua. La sílice es rechazada en un porcentaje superior a 99% por las membranas; por lo que, se concentra en el rechazo.

Se recomienda no superar concentraciones en el rechazo de 150 mg/L, ya que pueden producirse precipitados como silicatos de calcio y magnesio, que no son fácilmente disueltas por los ácidos y generan problemas posteriores.

✓ **Flúor**

Se encuentra en pequeñas cantidades en el agua subterránea. Puede proceder de la fluorita, principal mineral fluorado de rocas ígneas. En los procesos de desalación, es uno de los componentes más problemáticos del agua ya que su rechazo por las membranas es elevado y la solubilidad de sus sales que se concentran en la salmuera muy baja, siendo los riesgos de precipitación altos; teniendo contenidos en agua de 5-7 mg/L pueden resultar peligrosos.

En la Reglamentación Técnico Sanitaria se admiten contenidos máximos de flúor en el agua de 1,500 µg/L.

✓ **Bario y Estroncio**

No son elementos abundantes, pero su presencia se detecta en determinadas aguas subterráneas. Los sulfatos de estos dos elementos son mucho menos solubles que los de calcio, por lo que, pueden precipitar; el hexametáfosfato de sodio actúa eficazmente como anti-incrustante de ambos.

✓ **Aluminio**

Normalmente, no se localiza en aguas subterráneas ni artificiales, sólo si se produjo una contaminación de tipo industrial o vertido.

Los valores de pH que se trabaja más frecuentemente en ósmosis inversa son entre 6.5-7.5; por lo que, no representan por tanto un peligro, ya que la solubilidad del hidróxido de aluminio es menor a un pH de 5. Si se producen precipitados se eliminan mediante acidificación y el hidróxido de aluminio puede eliminarse por filtración.

✓ **Gases disueltos**

Además de iones constituyentes, las aguas de distinto origen pueden tener también gases disueltos. Esto es importante para el uso de aguas en ciertos sectores.

Los gases más comunes son oxígeno, sulfhídrico, dióxido de carbono, nitrógeno, anhídrido sulfuroso y amonio. Como la solubilidad de los gases es inversamente proporcional a la temperatura y aumenta con la presión, los gases disueltos intervienen en problemas de corrosión y de precipitación (Medina, 2000).

3. Oxígeno disuelto

El contenido de oxígeno en un agua varía de forma inversa con la temperatura, es decir, cuanto más elevada es ésta, menor será su contenido de oxígeno. La concentración de oxígeno disuelto en el agua es un índice significativo de su calidad sanitaria.

El agua que contiene oxígeno disuelto corroe los metales más rápido cuando el pH es bajo. Además, la presencia de oxígeno disuelto en el agua de alimentación favorece la proliferación de bacterias aerobias y por tanto la contaminación de las membranas.

4. Sulfhídrico

Cantidades tan pequeñas como 0.5 mg/L forman un ácido débil y el agua es generalmente corrosiva. Está presente en algunas aguas subterráneas y su exposición al aire produce finos precipitados de azufre que ocasionan importantes ensuciamientos de las membranas difíciles de eliminar; como gas pasa a través de las membranas y puede eliminarse mediante torres de desgasificación o cloración.

El SH_2 también aparece como resultado de la acción de bacterias sulfato reductoras. Estas bacterias cambian los sulfatos a sulfhídrico.

5. Dióxido de carbono

Su presencia en distintas aguas está en relación con los contenidos de materia orgánica; por lo que, si existe una importante actividad biológica en un suelo, el agua en contacto con él experimenta un aumento en la concentración de CO_2 , pero un descenso en la de O_2 .

Es un gas que se libera en las aguas carbonatadas como consecuencia de la regulación de pH que se realiza en el pretratamiento de ósmosis inversa. La liberación de CO_2 ocasiona un descenso del pH del agua y la hace más corrosiva mientras que como gas atraviesa las membranas de ósmosis inversa y por tanto aparece en el agua producto, a las que confiere agresividad y por tanto la exigencia de un post-tratamiento para evitar daños posteriores.

➤ Otros parámetros de influencia del agua

Existen otros parámetros que deben tomarse en cuenta desde el punto de vista global:

✓ Alcalinidad

Es la capacidad de un agua para neutralizar un ácido. Los iones carbonato y bicarbonato contribuyen a la alcalinidad, pero no los iones cloruro, sulfato y nitrato.

✓ Dureza

Está puede ser de dos formas:

- Carbonatada: causada por los carbonatos, incluyendo la porción de calcio y magnesio que se combina con el bicarbonato y cantidades pequeñas de carbonato presente, se le denomina temporal porque desaparece al hervir el agua.
- No carbonatada o permanente: causada por los nitratos, cloruros y sulfatos de Ca y Mg siendo la diferencia entre la dureza total y la carbonatada.

Anexo B. Descripción del sistema de retrolavado de filtros

La limpieza consiste en la recirculación del agua a contracorriente de la filtración, aplicando un caudal de agua que permita la expansión del medio poroso en un 15-20%, para que los sólidos se remuevan y sean arrastrados por la corriente de agua, se le conoce como lavado a contracorriente (backwashing). La función del lavado a contracorriente es realizar una reclasificación de los materiales en los filtros multicapa, dejando las partículas más grandes pero menos densas en la parte superior y las menores pero más densas en la parte inferior.

Los caudales de lavado aplicados varían en función del material filtrante, 8-11 L/m²· h para arena y los 5-8 L/m²· h para la antracita. Como agua de lavado debe utilizarse agua filtrada.

El costo de un filtro está en función de la superficie filtrante; por lo que, el diseño debe obtener la mayor producción sobre la menor superficie, esto implica un profundo conocimiento del tipo de agua a filtrar y de su variación en el tiempo y la adecuada elección del medio filtrante.

★ Parámetros de diseño

La principal finalidad es obtener un filtro que proporcione un agua que cumpla con las características exigidas, que los ciclos de funcionamiento sean lo más largos posibles y que una vez que se ensucia u obstruye, el lavado permita recuperar sus condiciones de funcionamiento.

Un aspecto a considerar es el espesor de la capa filtrante, dado que no existe un método preciso para su determinación, por ello, se recurre a pruebas piloto. Los espesores que comúnmente se emplean para los materiales son:

- Antracita: 45-60 cm
- Arena silícea: 35-45 cm

En el caso de ósmosis inversa existen algunos inconvenientes, especialmente en dos situaciones frecuentes que pueden presentarse:

- Para contaminación orgánica, el material filtrante puede ser un excelente medio de cultivo que incremente la proliferación bacteriana, sobre todo si se emplean polímeros en la coagulación.
- En presencia de hierro, al bajar el nivel de oxígeno en el agua se puede producir una reducción del ión férrico soluble, a ión ferroso insoluble; es decir que, atravesaría los filtros de arena e incluso los filtros cartucho alcanzando las membranas.

Si la distribución de sólidos retenidos a lo largo de la profundidad del medio es buena, mejor es el efecto de filtración y mayores los períodos de funcionamiento sin aplicar el lavado.

El material más empleado es la arena silícea, en el proceso de lavado se produce como ya se mencionó, una reclasificación de las partículas; como consecuencia, los sólidos en suspensión son retenidos en la parte superior del filtro formando una capa compacta de difícil penetración. Por lo que, la solución para filtros en instalaciones desaladoras es seleccionar dos materiales, de forma que el más grueso se coloque en la parte superior del filtro.

La finalidad de la limpieza con aire (*air scour*) es mejorar la efectividad del lavado a contracorriente y reducir el caudal de agua de lavado.

Anexo C. Descripción de filtros precapa y especiales

✓ Filtros de precapa

No son frecuentes en instalaciones de desalación, debido al alto nivel de filtrado que se consigue permite ser considerado en diseños de instalaciones problemáticas en cuanto a la calidad del agua a tratar. Fundamentalmente son aplicados en la industria alimentaria, química y farmacéutica que requieren permeados de alta calidad y en abastecimientos urbanos con aguas de baja turbidez.

✓ Filtros especiales

Serie de filtros de novedad en el mercado que emplean materiales nuevos como elementos de filtración. Por ejemplo, se emplea como material filtrante un material polimérico en forma de microgramos o bolas a las que se le agrega un aditivo que les confiere propiedades especiales realizando filtración por su granulometría y retención electroquímica de partículas coloidales en función de su carga o afinidad química.

La Filtración media dual es un proceso complejo y depende en conjunto de las características de las partículas a remover, de la granulometría y del sistema de filtración; siendo lo más importante la cantidad y calidad del filtrado (Ebrahim *et al.*, 2001).

Anexo D. Procesos no convencionales de desinfección

✓ Ozono (O₃)

Agente oxidante muy poderoso, siendo un 50% más fuerte que el cloro y un 90% que el bromo. Como desinfectante, el ozono es 3,000 veces más rápido que el cloro y 5,000 veces que el bromo.

La desinfección por ozono se realiza mediante la ruptura o desintegración de la pared celular bacteriana en un proceso conocido como lisis celular. Se puede aplicar en los siguientes usos:

- Desinfección bacteriana
- Destrucción de virus

Sin embargo, su alcance está más allá de la desinfección; puede ser utilizado en tratamientos de agua potable y desalada en:

- Mejora de las características de decantación.
- Reacciones de oxidación:
 - Eliminación de color, olor y sabor
 - Eliminación de algas
 - Eliminación de sulfuros y cianuros
 - Eliminación de precursores de trihalometanos
- Oxidación orgánica.
 - Detergentes
 - Pesticidas
 - Fenoles
 - Ácido húmico, fúlvico y tánico.
- Oxidación de hierro soluble, manganeso y otros metales pesados.
- Oxidación de compuestos orgánicos de moléculas grandes y poco degradables, transformándolas en lo contrario.

✓ **Radiación Ultravioleta**

Es considerado un tratamiento más físico que químico de desinfección ya que la luz penetra las paredes de las células de los microorganismos y es absorbida por el material celular, incluyendo ADN y ARN.

La luz UV es un poderoso bactericida y virucida, no contribuyendo a la formación de subproductos. La fuente más común de luz UV es la lámpara de vapor de mercurio de baja presión emitiendo una longitud de onda de 253.7 nm, siendo el valor óptimo de efectos germicidas.

La dosis requerida de luz UV para una desinfección efectiva depende de los microorganismos (bacterias, virus, hongos, esporas, protozoos, etc.). El grado de desinfección depende del tiempo de exposición y la intensidad. La principal ventaja de la luz UV es que no requiere productos químicos, como el agua de ósmosis inversa tiene una turbidez muy baja la luz UV resulta efectiva como desinfectante.

Su costo es elevado, por lo que no siempre se justifica su uso; no resulta muy eficiente en aguas de turbidez alta; por ello, su aplicación es más factible en el post que en el pretratamiento.

Anexo E. Otros pretratamientos para problemas específicos de contaminación

En ocasiones se presentan problemas específicos que requieren cuidados apropiados (Medina, 2000), como:

✓ **Aceites y grasas**

La eliminación de aceites y grasas se puede realizar por medio de carbón activo en forma granular o en polvo. Para el primer caso se aplica como filtros similar a los de arena y para el segundo caso se aplica mediante la preparación de una solución espesa que se dosifica en continuo en los colectores de alimentación antes de los filtros arena.

✓ **Ácido sulfhídrico**

Al oxidarse se transforma en azufre elemental, produciendo un ensuciamiento sobre las membranas de azufre coloidal siendo difícil de eliminar por limpieza. No existe ningún pretratamiento que evite el ensuciamiento por azufre coloidal; por ello, se debe cuidar el diseño evitando que el aire no penetre en el sistema evitando la oxidación.

Las principales aguas que contienen este problema son principalmente las aguas subterráneas.

✓ **Hierro**

Se puede encontrar en el agua en forma soluble e insoluble, siendo en la segunda forma la que ocasiona los problemas de ensuciamiento. La solubilidad de este Fe^{2+} está limitada por el $FeCO_3$; como regla, las aguas altamente alcalinas tienen menores concentraciones de hierro que las aguas de baja alcalinidad. Es más frecuente en aguas de pozo que en aguas de mar.

El Fe^{2+} soluble es rechazado por las membranas como cualquier ión bivalente y no produce ensuciamiento. Si el Fe^{2+} se oxida a Fe^{3+} se forman compuestos como $Fe(OH)_3$ y Fe_3O_4 que son insolubles. Otra fuente de hierro insoluble son las bacterias de hierro como *Crenothrix*, *Leptothrix* y *Gallionellax* que oxidan de Fe^{2+} a Fe^{3+} .

La oxidación del Fe^{2+} se previene bajando el pH por debajo de 5.5 así se pueden mantener contenidos de Fe^{2+} hasta de 4 mg/L sin ensuciamiento. Si el contenido es superior a 4 mg/L hay que eliminarlo con cloro o permanganato que forman óxidos insolubles de hierro que pueden ser eliminados por filtración. Los iones Cl^- y $SO_4^{=}$ en las concentraciones existentes del agua de mar retrasan la oxidación del Fe^{2+} .

✓ **Sílice**

Causa problemas a las membranas cuando el rechazo (salmuera) sobrepasa sus límites de solubilidad; la precipitación de sílice sobre las membranas provoca ensuciamiento irreversible.

La forma más eficaz de evitar el ensuciamiento es bajando la conversión del sistema hasta valores que no superen los límites de solubilidad en el concentrado.

El contenido de sílice en agua puede reducirse por medio de coagulación-floculación empleando cloruro férrico y cal y cantidad mínima de algún polielectrolito orgánico; siendo bastante complejo por equipo a utilizar y dosificación y no viable económicamente. De igual forma con la ultrafiltración, elimina el 99% de la sílice pero es bastante costoso.

Anexo F. Reactivos y dosis aplicadas en plantas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa para cada proceso del pretratamiento a nivel mundial

La tabla F1 presenta los reactivos y dosis aplicadas en plantas de desalación de agua de mar a nivel mundial.

Tabla F. 1. Reactivos y dosis aplicadas en plantas de desalación de ósmosis inversa a nivel mundial

	Desinfección (NaOCl)	Ajuste pH (H₂SO₄)	Coagulación (FeCl₃)	Coadyuvante	Decloración (NaHSO₃)	Antiincrustante
Bonnelye <i>et al.</i> , 2004			2-5 mg/L			
Brehant <i>et al.</i> , 2002	5 mg/L	Sin ajuste de pH			3 mg/L	3 mg/L (RO Plus 11)
Ebrahim <i>et al.</i> , 2001	Cl ₂ agua alimentación = 0.15 mg/L Cl ₂ después tanque almacenamiento = 0.16 mg/L	Dosis H ₂ SO ₄ = 82.24 mg/L pH agua filtrada = 6.21	Dosis FeClSO ₄ (Fe ³⁺) = 3.04 mg/L	Dosis polielectrolito = 0.62 mg/L	2.5 mg/L	
Vial <i>et al.</i> , 2002			2 mg/L			
Wilf <i>et al.</i> , 1998	3 mg/L		5 mg/L	Polímero = 0.2 mg/L	3 mg/L	
Aboabboud <i>et al.</i> , 2007	3 mg/L	60.4 mg/L	5 mg/L			Polifosfato 3.86 mg/L
Khawaji <i>et al.</i> , 2007	1.4 mg/L Cloro residual 0.5-0.7 mg/L	H ₂ SO ₄ (98%) = 170 mg/L	5.2 mg/L	Polielectrolito orgánico = 1.4 mg/L	15.2 mg/L	2.6 mg/L
Leparc <i>et al.</i> , 2007	0.3 mg/L		Polímero catiónico Genefloc GPF=2 mg/L		1.8 mg/L	Genesys LF = 1.8 mg/L
Fritzmann <i>et al.</i> , 2007	3 mg/L	25 mg/L	3 mg/L	Coagulante catiónico = 0.85 mg/L	6 mg/L	1.05 mg/L

Anexo G. Procedimiento para preparación del agua de mar sintética

El procedimiento para la preparación del agua de mar sintética se describe a continuación:

- Se llenan tanques de 1,100 L de agua
- Se declora el agua de tanques para eliminar el cloro residual
- Se agrega 35 g de sal por litro de agua preparada
- Se agita hasta diluir toda la sal agregada
- Se deja sedimentar por 6 horas como mínimo
- Se agrega agua de una presa con la finalidad de igualar la turbiedad y el color del agua de mar.

Se prepararon 48 m³ de agua de mar sintética para ambos pretratamientos aplicados en planta piloto de desalación por ósmosis inversa con una turbiedad promedio de 7.8 NTU, un color promedio de 87 U Pt-Co y una conductividad eléctrica de 39.6 mS/cm.

Anexo H. Cálculo para la determinación del Índice de Densidad de Ensuciamiento (IDE) (Silt Density Index (SDI)).

Para calcular el IDE se tiene la siguiente ecuación:

$$IDE_T = \%P_{30}/t_T = [(1 - (t_i/t_f))] 100/t_T$$

Donde:

$\%P_{30}$ = porcentaje de taponamiento a 207 kPa (30 psi) de presión de alimentación.

t_T = tiempo total de flujo transcurrido, min (usualmente 15 min).

T_i = tiempo inicial requerido para colectar 500 mL de muestra.

t_f = tiempo requerido para colectar 500 mL de muestra después del tiempo total (t_T) de la prueba (usualmente 15 min).

Por último para reportar la información se sugiere lo siguiente:

- Reportar los valores de IDE, con un subíndice indicando el tiempo total de flujo transcurrido (t_{total}) en minutos.
- La temperatura del agua antes y después de la prueba y,
- El fabricante del filtro membrana 0.45 μ m usado para la prueba, así como sus datos de identificación.

Procedimiento para cálculo del IDE_{15} para el agua de mar en estudio a 17°C:

$$t_i = 8.51 \text{ s}$$

$$t_f = 26.75 \text{ s}$$

La técnica D4189 de la ASTM para la medición del IDE nos advierte de no exceder del 75% en el valor de $\%P_{30}$ para que el método de medición sea representativo:

$$\%P_{30} = (1 - (t_i/t_f)) 100$$

Para el caso del IDE_{15} , con base en los valores de tiempo obtenidos en la prueba realizada en laboratorio:

$$\%P_{30} = (1 - (8.51 \text{ s}/26.75 \text{ s})) 100 = 68.19\%$$

Este valor no excede el 75% por lo que este método es adecuado para la medición del IDE. Continuando con el cálculo, ahora solo nos falta dividir el valor de $\%P_{30}$ entre el tiempo total de la prueba como se demuestra abajo en la ecuación:

$$IDE_{15} = \%P_{30}/t_T = [(1 - (t_i/t_f))] 100/t_T = ((1 - (8.51 \text{ s}/26.75 \text{ s})) 100)/15 \text{ min} = (68.19 \% / 15 \text{ min})$$

$$IDE_{15} = \mathbf{4.55 \% / min}$$

En la tabla 3.3 se reportan los valores para el IDE_5 y IDE_{15} .

Se utilizaron filtros membrana marca Millipore hechos de una mezcla de esteres de celulosa con un tamaño de poro de 0.45 μ m y 47 mm de diámetro.

Anexo I. Comportamiento del pH con respecto a dosis de H₂SO₄ y HCl 0.1 N agregado al agua de mar

La tabla I.1 presenta el comportamiento del pH del agua de mar (abril 2009) con ambos ácidos evaluados.

Tabla I. 1. Comportamiento de pH con respecto a dosis de H₂SO₄ y HCl 0.1 N agregado al agua de mar (abril 2009)

Volumen H ₂ SO ₄ 0.1 N (mL)	pH	Volumen H ₂ SO ₄ 0.1 N (mL)	pH	Volumen HCl 0.1 N (mL)	pH	Volumen HCl 0.1 N (mL)	pH
0	8.01	2.1	5.52	0	8.02	2.1	5.24
0.1	7.85	2.2	5.41	0.1	7.85	2.2	5.03
0.2	7.57	2.3	5.27	0.2	7.54	2.3	4.69
0.3	7.27	2.4	5.11	0.3	7.24	2.4	4.25
0.4	7.05	2.5	4.81	0.4	7.02	2.5	3.95
0.5	6.88	2.6	4.44	0.5	6.85	2.6	3.75
0.6	6.74	2.7	4.09	0.6	6.71	2.7	3.59
0.7	6.64	2.8	3.85	0.7	6.58	2.8	3.49
0.8	6.53	2.9	3.69	0.8	6.48	2.9	3.4
0.9	6.45	3.0	3.57	0.9	6.39	3.0	3.33
1.0	6.37	3.1	3.47	1.0	6.3	3.1	3.26
1.1	6.27	3.2	3.39	1.1	6.23	3.2	3.21
1.2	6.21	3.3	3.3	1.2	6.14	3.3	3.16
1.3	6.15	3.4	3.25	1.3	6.07	3.4	3.11
1.4	6.07	3.5	3.2	1.4	5.99	3.5	3.07
1.5	6.01	3.6	3.15	1.5	5.91	3.6	3.04
1.6	5.92	3.7	3.11	1.6	5.83	3.7	3
1.7	5.86	3.8	3.07	1.7	5.73	3.8	2.97
1.8	5.78	3.9	3.04	1.8	5.65	3.9	2.94
1.9	5.71	4.0	3	1.9	5.54	4.0	2.91
2.0	5.62			2.0	5.41		

Anexo J. Resultados de pruebas en laboratorio del proceso precloración con un intervalo de dosis de 0-10 mg/L

Para la determinación de la dosis de hipoclorito de sodio (NaOCl) a agregar para la precloración, se inicio agregando una dosis en el intervalo de 0-10 mg/L a muestras de 500 mL (tabla J.1) de agua de mar con su respectiva determinación del cloro residual a media hora.

Tabla J. 1. Determinación del cloro residual para la precloración a media hora

Jarra	Dosis de Cl ₂ inicial (mg/L)	Cl ₂ residual a 30 min (mg/L)	Cl ₂ consumido a 30 min (mg/L)
1	0	0	0
2	2	0.8	1.2
3	4	2.1	1.9
4	6	3.9	2.1
5	8	5.5	2.5
6	10	7.8	2.2

La figura J.1 muestra el comportamiento del cloro residual con respecto a la dosis inicial agregada.

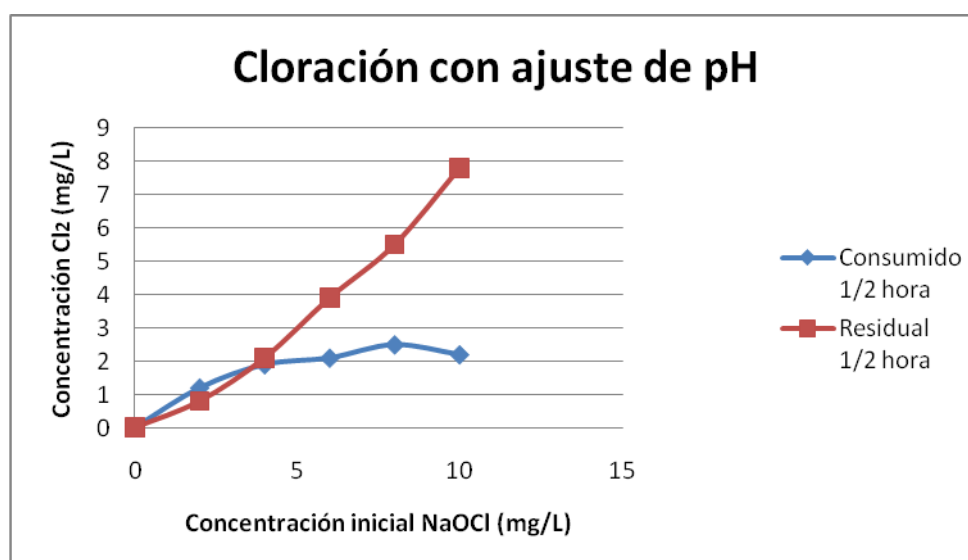


Figura J. 1. Comportamiento del cloro residual con respecto a la dosis inicial de cloro.

La tabla J.2 muestra las pruebas de precloración al agua de mar a dosis menor (1-3.5 mg/L).

Tabla J. 2. Valores de cloro residual para la precloración a media y dos horas con intervalo de dosis de cloro de 1-3.5 mg/L.

Muestra	Dosis de Cl ₂ inicial (mg/L)	Cl ₂ residual a 30 min (mg/L)	Cl ₂ residual a 2 horas (mg/L)
1	1	0.3	0.2
2	1.5	0.6	0.5
3	2	1.1	0.9
4	2.5	1.5	1.3
5	3	1.9	1.5
6	3.5	2.2	1.9

Anexo K. Resultados de dosificación de coagulantes (0-10 mg/L) al agua de mar

La tabla K.1 presenta las diferentes dosis de FeCl_3 aplicadas al agua en estudio y determinación de algunos parámetros de calidad de agua.

Tabla K. 1. Dosis de FeCl_3 (0-10 mg/L) aplicadas al agua en estudio (febrero de 2009) y parámetros de calidad

Jarra	Dosis FeCl_3 (mg/L)	pH	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)
1 (blanco)	0	8.1	51	18	2.75
2	2	6.86	50.6	11	0.41
3	4	6.69	50.5	7.5	0.09
4	6	6.58	50.3	7	0.77
5	8	6.49	50.2	8	0.67
6	10	6.4	50	7	0.28

La tabla K.2 presenta las diferentes dosis de PAX-29 aplicadas al agua en estudio y determinación de algunos parámetros de calidad de agua.

Tabla K. 2. Dosis de PAX-29 (0-10 mg/L) aplicadas al agua en estudio (febrero de 2009) y parámetros de calidad

Jarra	Dosis PAX-29 (mg/L)	pH	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)
1 (blanco)	0	7.99	51	18	2.13
2	2	6.89	50.6	7	1.01
3	4	6.83	50.5	6	1.25
4	6	6.68	50.4	10.5	1.88
5	8	6.68	50.4	13	2.07
6	10	6.63	50.3	17	2.64

La tabla K.3 presenta las diferentes dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ aplicadas al agua en estudio y determinación de algunos parámetros de calidad de agua.

Tabla K. 3. Dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (0-10 mg/L) aplicadas al agua en estudio (febrero de 2009) y parámetros de calidad

Jarra	Dosis $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (mg/L)	pH	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)
1 (blanco)	0	8.05	51.1	14	2.37
2	2	6.66	50.6	0	0.15
3	4	6.48	50.6	0	0.04
4	6	6.29	50.5	0	0.09
5	8	6.26	50.4	0	0.12
6	10	6.06	50.2	0	0.16

Las figuras K.1y K.2 presentan el comportamiento de los parámetros turbiedad y color con respecto al coagulante aplicado.

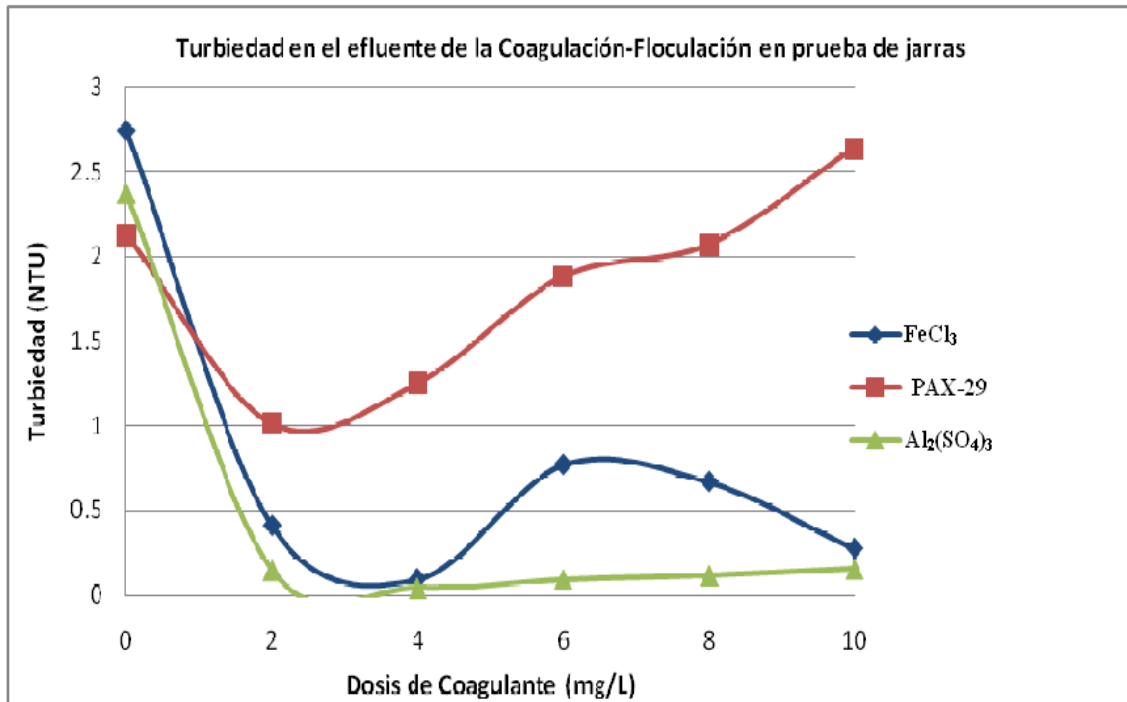


Figura K. 1. Comportamiento de la turbiedad con respecto a dosis de coagulante aplicado (0-10 mg/L) al agua de mar (febrero de 2009).

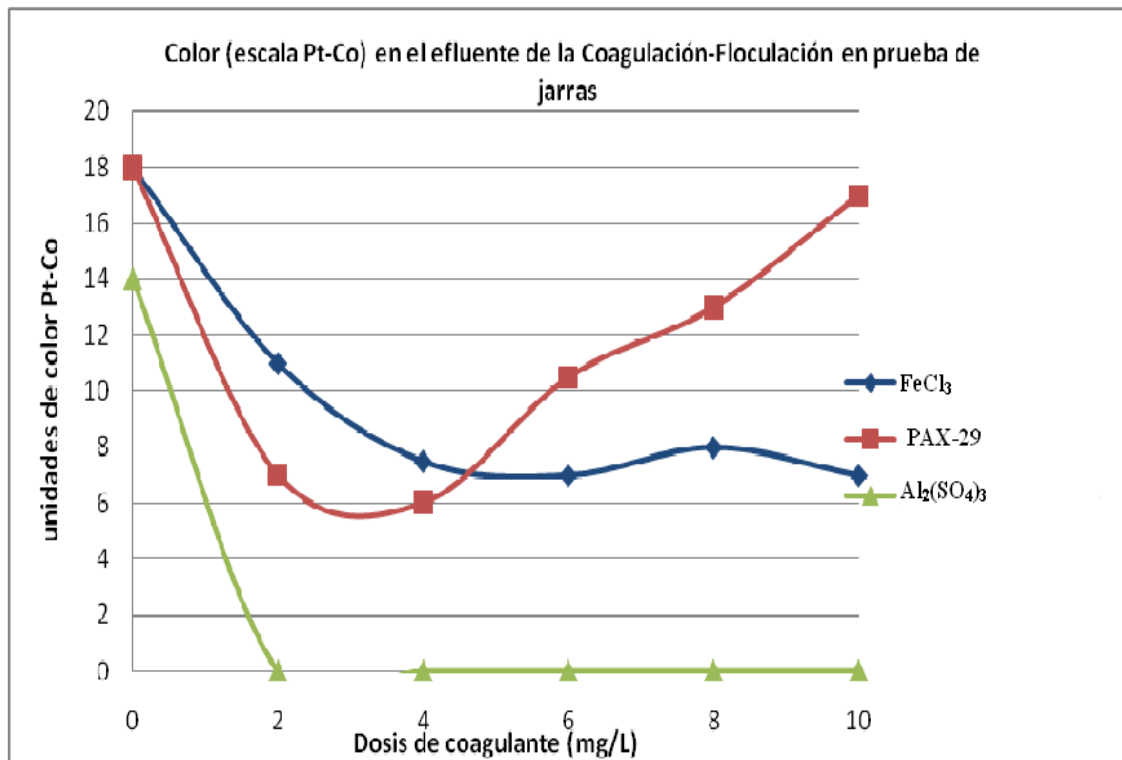


Figura K. 2. Comportamiento del color con respecto a dosis de coagulante aplicado (0-10 mg/L) al agua de mar (febrero de 2009).

La tabla K.4 presenta las diferentes dosis en intervalo menor (1-4.5 mg/L) de FeCl₃ aplicadas al agua en estudio y determinación de algunos parámetros de calidad de agua.

Tabla K. 4. Dosis de FeCl₃ en intervalo menor (1-4.5 mg/L) aplicadas al agua en estudio (febrero de 2009) y parámetros de calidad

Jarra	Dosis FeCl ₃ (mg/L)	pH	Conductividad (mS/cm)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)
1 (Blanco)	0	8.19	51.9	16	1.81
2	2.5	6.7	51.7	7	0.235
3	3	6.66	51.8	6	0.115
4	3.5	6.67	51.8	9	0.15
5	4	6.7	51.7	6.5	0.115
6	4.5	6.64	51.6	10	0.09

La tabla K.5 presenta las diferentes dosis de PAX-29 en intervalo menor (1-6 mg/L) aplicadas al agua en estudio y determinación de algunos parámetros de calidad de agua.

Tabla K. 5. Dosis de PAX-29 en intervalo menor (1-6 mg/L) aplicadas al agua en estudio (febrero de 2009) y parámetros de calidad

Jarra	Dosis PAX-29 (mg/L)	pH	Conductividad (mS/cm)	Color (Pt Co)	Turbiedad (NTU)
1(Blanco)	0	7.99	51	13.5	1.495
2	2.69	6.87	50.8	8.5	0.79
3	3.36	6.89	50.6	6	0.52
4	4	6.91	50.5	3	0.135
5	4.71	6.92	50.5	3.5	0.125
6	5.38	6.94	50.4	3	0.225

La tabla K.6 presenta las diferentes dosis de Al₂(SO₄)₃ en intervalo menor (1-3 mg/L) aplicadas al agua en estudio y determinación de algunos parámetros de calidad de agua.

Tabla K. 6. Dosis de Al₂(SO₄)₃ en intervalo menor (1-3 mg/L) aplicadas al agua en estudio (febrero de 2009) y parámetros de calidad

Jarra	Dosis Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	pH	Conductividad (mS/cm)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)
1	0	8.05	51.1	15	2.82
2	1	6.7	50.8	0	0.44
3	1.5	6.75	50.7	0	0.17
4	2	6.76	50.6	0	0.16
5	2.5	6.79	50.6	0	0.155
6	3	6.82	50.6	2	0.18

Anexo L. Resultados de caracterización e IDE *in situ* para la simulación del pretratamiento de filtración directa en planta piloto de ósmosis inversa (abril 2009)

Tabla L. 1. Resultados de caracterización del agua de mar y valores de IDE obtenidos para pretratamiento preseleccionado filtración directa aplicado *in situ* (abril 2009)

FECHA: Viernes 03-Abril-2009								
PRETRATAMIENTO (PROCESO)	PARÁMETROS						IDE ₅ (500 mL)	IDE ₅ (100 mL)
	pH _i	pH [°] / _{ácido}	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)	Cl ₂ dosificado/Cl ₂ residual (mg/L)	Temperatura (°C)		
Agua cruda	8.08	---	2.87/3.15	30/31	---	27°C	18.96	19.43
FILTRACIÓN DIRECTA (HCl+NaOCl)	8.08	6.53	4.18/4.38 ([°] / _{filtrar})	15/15 ([°] / _{filtrar})	1.5/0.1	29°C	19.32	19.09
FILTRACIÓN DIRECTA (HCl+NaOCl+NaHSO ₃)	8.08	6.57	0.1/0.05 ([°] / _{filtración})	0/0 ([°] / _{filtración})	0	29°C	18.77	18.47
FILTRACIÓN DIRECTA (H ₂ SO ₄ + NaOCl)	8.1	6.5	2.99/2.80 ([°] / _{filtrar})	33/33 ([°] / _{filtrar})	2/0.1	27°C	17.51	17.31
FILTRACIÓN DIRECTA (H ₂ SO ₄ + NaOCl+NaHSO ₃)	8.1	6.55	0.13/0.1 ([°] / _{filtración})	1/0 ([°] / _{filtración})	0	27°C	16.73	16.99

Anexo M. Resultados de pruebas de jarras realizadas *in situ* en período vacacional (abril 2009)

La tabla M.1 presenta los resultados de las pruebas de jarras empleando HCl para ajuste de pH, NaOCl para precloración y FeCl₃ como coagulante.

Tabla M. 1. Resultados de pruebas de jarras aplicando HCl+NaOCl+FeCl₃ al agua de mar (abril de 2009)

Jarra	pH (HCl)	NaOCl (mg/L)	Dosis FeCl ₃ (mg/L)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)	Cl ₂ residual (mg/L)
Agua cruda	8.06	---	---	19	2.65	---
1	6.5	0.5	0	4.5	1.42	0
2	6.5	1	0.5	6.5	1.59	0.1
3	6.5	1.5	1	4.5	1.96	0.1
4	6.5	2	1.5	8.5	1.59	0.1
5	6.5	2.5	2	5.5	1.57	0.1
6	6.5	3	2.5	6.5	2.8	0.1

La tabla M.2 presenta los resultados de las pruebas de jarras empleando HCl para ajuste de pH, NaOCl para precloración y Al₂(SO₄)₃ como coagulante.

Tabla M. 2. Resultados de pruebas de jarras aplicando HCl+NaOCl+Al₂(SO₄)₃ al agua de mar (abril de 2009)

Jarra	pH (HCl)	NaOCl (mg/L)	Dosis Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)	Cl ₂ residual (mg/L)
Agua cruda	8.06	---	---	19	2.65	---
1	6.48	0.5	0.5	1	3.4	0
2	6.5	1	1	4.5	3.13	0.1
3	6.5	1.5	1.5	11	3.02	0.1
4	6.5	2	2	8	2.30	0.1
5	6.5	2.5	2.5	4.5	2.46	0.1
6	6.44	3	3	1	1.28	0.1

La tabla M.3 presenta los resultados de las pruebas de jarras empleando H₂SO₄ para ajuste de pH, NaOCl para precloración y Al₂(SO₄)₃ como coagulante.

Tabla M. 3. Resultados de pruebas de jarras aplicando $H_2SO_4+NaOCl+FeCl_3$ al agua de mar (abril de 2009)

Jarra	pH (H_2SO_4)	NaOCl (mg/L)	Dosis $FeCl_3$ (mg/L)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)	Cl_2 residual (mg/L)
Agua cruda	8.08	---	---	19	2.65	---
1	6.5	1	0.5	12.5	2.05	0.1
2	6.5	1.5	1	11.5	2.08	0.1
3	6.5	2	1.5	27	2.22	0.1
4	6.5	2.5	2	17.5	1.99	0.2
5	6.5	3	2.5	29.5	2.44	0.4
6	6.48	3.5	3	32.5	2.69	0.5

La tabla M.4 presenta los resultados de las pruebas de jarras empleando HCl para ajuste de pH, NaOCl para precloración y $Al_2(SO_4)_3$ como coagulante.

Tabla M. 4. Resultados de pruebas de jarras aplicando $H_2SO_4+NaOCl+Al_2(SO_4)_3$ a agua de mar (abril de 2009)

Jarra	pH (H_2SO_4)	NaOCl (mg/L)	Dosis $Al_2(SO_4)_3$ (mg/L)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)	Cl_2 residual (mg/L)
Agua cruda	8.02	---	---	19	2.65	---
1	6.5	1	0.5	19.5	2.59	0.1
2	6.5	1.5	1	23.5	2.28	0.1
3	6.43	2	1.5	26.5	2.28	0.2
4	6.5	2.5	2	6	2.09	0.3
5	6.45	3	2.5	15	0.88	0.5
6	6.44	3.5	3	1.5	0.86	0.6

Anexo N. Procedimiento para la dosificación necesaria para eliminar el cloro residual libre con bisulfito de sodio

Para la eliminación de cloro residual libre en agua pretratada se requiere que por cada parte de cloro residual libre se requieren tres partes de bisulfito de sodio (1:3); con base en lo anterior, a continuación se describe un ejemplo:

Se tiene una solución preparada de bisulfito de sodio con una concentración de 10 mg/ml.

A una cantidad de agua de mar (85 L) se realizó el pretratamiento y se determinó que el cloro residual libre es de 1.4 mg/L; por lo tanto, se debe calcular el cloro residual libre total:

$$(1.4 \text{ mg/L}) (85\text{L}) = 119 \text{ mg cloro residual total}$$

Obteniendo el valor de cloro residual total, éste se multiplica por tres, ya que por cada parte de cloro residual se requieren tres de bisulfito de sodio:

$$(119 \text{ mg}) (3) = 357 \text{ mg de bisulfito necesario}$$

Conociendo el valor de bisulfito de sodio necesario, se calcula los mL necesarios de la solución preparada; si tenemos una solución preparada de 10 mg/mL entonces:

$$(357 \text{ mg}) (1 \text{ mL}/10 \text{ mg bisulfito de sodio}) = 35.7 \text{ mL de bisulfito de sodio}$$

Para eliminar un cloro residual libre de 1.4 mg/L a 85 L de agua pretratada se requieren 35.7 mL de bisulfito de sodio a una concentración de 10 mg/mL.

Anexo O. Resultados de caracterización e IDE *in situ* para la simulación del pretratamiento de coagulación-floculación-filtración en planta piloto de ósmosis inversa (abril 2009)

Tabla O. 1. Resultados de caracterización del agua de mar y valores de IDE obtenidos para pretratamiento preseleccionado coagulación-floculación-filtración aplicado *in situ* (abril 2009)

FECHA: Sábado 04-Abril-2009								
PRETRATAMIENTO (PROCESO)	PARÁMETROS						IDE ₅ (500 mL)	IDE ₅ (100 mL)
	pH _i	pH °ácido	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)	Cl ₂ dosificado/Cl ₂ residual (mg/L)	Temperatura (°C)		
Agua cruda	8.2	---	3.27/3.01	14/10	---	27°C	18.77	19.41
Coagulación-Floculación 1) (HCl+NaOCl+FeCl ₃)	8.2	6.47	4.59/4.04 (^s /filtrar)	21/20 (^s /filtrar)	5/0.1	27°C	18.95	19
Coagulación-Floculación 1A) (HCl+NaOCl+FeCl ₃ +NaHSO ₃)	8.2	6.51	0.35/0.14 (^c /filtración)	2/1 (^c /filtración)	0	28°C	18.98	18.63
Agua cruda	8.1	---	10.57/10.46	63/64	---	---	---	---
Coagulación-Floculación 2) (HCl+NaOCl+Al ₂ (SO ₄) ₃)	8.1	6.5	5.42/5.56 (^s /filtrar)	38/45 (^s /filtrar)	8/0.1	29°C	11.69	14.2
Coagulación-Floculación 2A) (HCl+NaOCl+Al ₂ (SO ₄) ₃ +NaHSO ₃)	8.1	6.53	0.01/0.01	1/1	0	29°C	14.77	15.15
Agua cruda	8.15	---	8.12/7.94	24/24	---	---	---	---
Coagulación-Floculación 3) (H ₂ SO ₄ +NaOCl+FeCl ₃)	8.15	6.52	6.65/6.92 (^s /filtrar)	21/19 (^s /filtrar)	10/0.8	28°C	18.79	16.9
Coagulación-Floculación 3A) (H ₂ SO ₄ +NaOCl+FeCl ₃ +NaHSO ₃)	8.15	6.6	1.44/0.99 (^c /filtración)	1/1 (^c /filtración)	0	28°C	16.15	16.61

Tabla O. 2. Resultados de caracterización del agua de mar y valores de IDE obtenidos para pretratamiento preseleccionado coagulación-floculación-filtración aplicado *in situ* (abril 2009) (continuación)

FECHA: Domingo 05-Abril-2009								
PRETRATAMIENTO (PROCESO)	PARÁMETROS						IDE ₅ (500 mL)	IDE ₅ (100 mL)
	pH _i	pH °/ácido	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)	Cl ₂ dosificado/Cl ₂ residual (mg/L)	Temperatura (°C)		
Agua cruda	7.93	---	9.94/9.63	45/43	---	---	15.28	19.14
Coagulación-Floculación 4) (H ₂ SO ₄ +NaOCl+ Al ₂ (SO ₄) ₃)	7.93	6.5	6.55/6.78 (^s /filtrar)	30/36 (^s /filtrar)	10/0.5	29°C	17.37	16.57
Coagulación-Floculación 4A) (H ₂ SO ₄ +NaOCl+ Al ₂ (SO ₄) ₃ +NaHSO ₃)	7.93	6.55	0.02/0.01 (^c /filtración)	1/1 (^c /filtración)	0	29°C	16.6	17.51
Agua cruda	8.12	---	7.7/7.86	46/48	---	---	---	---
Coagulación-Floculación 5) (HCl+NaOCl+FeCl ₃)*	8.12	6.44	4.08/4.35 (^s /filtrar)	68/70 (^s /filtrar)	10/0.3	27°C	13.59	11.72
Coagulación-Floculación 5A) (HCl+NaOCl+FeCl ₃ +NaHSO ₃)	8.12	6.5	0.25/0.21 (^c /filtración)	1/1 (^c /filtración)	0	27°C	10.29	10.73
Agua cruda	8.05	---	6.63/6.17	27/25	---	---	---	---
Coagulación-Floculación 6) (H ₂ SO ₄ +NaOCl+FeCl ₃)*	8.05	6.5	4.44/4.43 (^s /filtrar)	20/21 (^s /filtrar)	10/1.6	27°C	16.47	12.78
Coagulación-Floculación 6A) (H ₂ SO ₄ +NaOCl+FeCl ₃ + NaHSO ₃)	8.05	6.55	0.01/0.01 (^c /filtración)	0/1 (^c /filtración)	0	27°C	16.12	15.82

ABREVIATURAS

ADN: Ácido desoxirribonucleico

APHA: American Public Health Association (Asociación Americana de Salud Pública)

ARN: Ácido ribonucleico

ASTM: American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales)

BAP: Bomba de Alta Presión

BC: Bomba de Alimentación

Ca: Concentración de sales en la alimentación

CE: Conductividad Eléctrica

CFF: Coagulación-floculación-filtración dual

COD: Carbono Orgánico Disuelto

COT: Carbono Orgánico Total

Cp: Concentración de sales en el producto o permeado

DCV: Destilación de Compresión de Vapor

DME: Destilación Multi-efecto

DSME: Destilación Súbita Multi-etapa

ED: Electrodiálisis

et al: y colaboradores

FAD: Flotación con Aire Disuelto

FC: Filtro Cartucho

FD: Filtro Dual

FD*: Filtración Directa

IDA: International Desalting Association (Asociación Internacional de Desalación)

L: Litro

MC: Medidor de Calidad

ME: Mezclador Estático

MF: Microfiltración

MF-x: Medidor de flujo

mg: Miligramo

min: minuto

mL: Mililitro

MP: Medidor de Presión

MIDE: Medidor de Índice de Densidad de Ensuciamiento

MT: Medidor de Temperatura

μS: MicroSiemens

m: Metro

mm: Milímetro

N: Normal (Normalidad)

NF: Nanofiltración

nm: Nanómetros

NOM: Norma Oficial Mexicana

NTU: Unidades de Turbiedad Nefelométricas

OI: Ósmosis Inversa

pH: Potencial de hidrógeno

Ps: Paso de sales

PVC: Poli Vinil Cloruro

pz: Pieza

Qa: Flujo de alimentación

Qp: Flujo de permeado

R: Recuperación o recobro

RPM: Revoluciones por minuto

Rs: Rechazo de sales

IDE: Índice de Densidad de Ensuciamiento

SDT: Sólidos Disueltos Totales

SSA: Secretaría de Salud

SST: Sólidos Suspendidos Totales

TA: Tanque de Almacenamiento

TFC: Membrana de Poliamida Compuesta

TLM: Tanque de Lavado de Membranas

TRF: Tanque de Retrolavado de Filtro

UF: Ultrafiltración

UV: Ultravioleta