



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Química

**Desmineralización de agua de mar mediante membranas cerámicas modificadas**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en

Ciencias Ambientales

Presenta

I.Q. Carlos Benjamín Bonilla Suárez

Dirigido por

Dr. Víctor Pérez Moreno

Querétaro, Qro. Junio de 2011



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Química  
Maestría en Ciencias Ambientales

**DESMINERALIZACIÓN DE AGUA DE MAR MEDIANTE MEMBRANAS  
CERÁMICAS MODIFICADAS**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias Ambientales

**Presenta:**

Ing. Carlos Benjamín Bonilla Suárez

**Dirigido por:**

Dr. Víctor Pérez Moreno  
SINODALES:

Dr. Víctor Pérez Moreno  
Presidente

M.C. Gustavo Pedraza Aboytes  
Secretario

Dr. Wilverth Rodolfo Villatoro Monzón  
Vocal

Dra. Maricela González Leal  
Suplente

M.C. Yadira Ortega Silva  
Suplente

Q.B. Magali Elizabeth Aguilar Ortiz  
Director de la Facultad de Química

  
Firma  
Firma  
Firma  
Firma  
Firma  
Firma

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario,  
Querétaro, Qro.  
Junio de 2011  
México

## RESUMEN

Ante un creciente patrón de uso no renovable del agua, las tecnologías a membrana para la eliminación de iones disueltos al agua salada o salobre son unos de los procesos más adecuados como fuente alternativa para diversificar las opciones de abastecimiento de agua, por sus ventajas ambientales, de calidad y costo. Dentro de estas tecnologías, la ósmosis inversa con membranas poliméricas es la que actualmente tiene mayor crecimiento. Las membranas cerámicas tienen ventajas por tener mayor resistencia mecánica y química, pero tienen tamaño de poro mayor que las de ósmosis inversa. El objetivo de esta tesis fue evaluar el desempeño de la desmineralización de agua de mar con membranas cerámicas de nanofiltración modificadas por impregnación con sales metálicas (plata y platino) y demostrar que se tiene una mayor remoción que de membranas sin impregnar. Se trabajó con agua de mar de la Bahía del Potosí, Gro, la cual fue caracterizada espacial y temporalmente. Se montaron un reactor a membrana cerámica y una planta piloto de ósmosis inversa con membranas poliméricas para determinar parámetros de operación de las membranas y contrastarlos. Se logró llegar a obtener una remoción de casi 30% de sólidos disueltos totales para las membranas cerámicas impregnadas y una remoción cercana a 70% para cationes divalentes en el caso de membranas impregnadas con platino; valores mayores a los obtenidos con membranas cerámicas sin impregnar. También se realizó la determinación del consumo energético de las membranas impregnadas y se obtuvo un ahorro de 75% al compararse con membranas poliméricas de ósmosis inversa. Por los resultados obtenidos se demostró que el proceso de impregnación con metales de membranas cerámicas de nanofiltración tiene el potencial de aplicación para lograr una desmineralización parcial o para usarse como una etapa previa a la desalinización completa de agua de mar por ósmosis inversa al abatir los costos.

(Palabras claves: “desalinización”, “membranas cerámicas”, “impregnación con metales”, “nanofiltración”, “desmineralización de agua de mar”).

## SUMMARY

Due to the increase of non-sustainable water use pattern, membrane technologies to achieve the elimination of the dissolved ions of salted or brackish water are some of the most suitable processes as an alternative source to diversify water supply options cause of its environmental, quality and cost advantages. Within these technologies, reverse osmosis using polymeric membranes is currently the one with a larger growth. Ceramic membranes have some advantages as they are more resistant, chemically and mechanically, but their pore size is bigger than the ones for reverse osmosis. The main objective of this thesis was to evaluate the performance in seawater demineralization using modified nanofiltration ceramic membranes, after impregnating them with metallic salts (silver and platinum) and demonstrate that better removal is gotten after comparing with membranes without impregnation. This research was carried out using seawater from Bahía del Potosí, Gro, which was characterized in both, space and time. Two equipments were assembled, a reactor for the ceramic membranes and a pilot reverse osmosis plant with polymeric membranes, to determine the operation parameters of both type of membranes and compare them. We obtained a total dissolved solid removal close to 30 % with the impregnated ceramic membranes and almost 70% of divalent ions removal with membranes impregnated with platinum; which are values considerable higher than the ones obtained with membranes without impregnation. Electric consumption was measured using impregnated ceramic membranes and a saving of almost 75% was obtained after comparing with polymeric reverse osmosis membranes. These results demonstrated that metallic impregnation process of nanofiltration ceramic membranes has a potential scope to apply for achieve; as a partial demineralization or to be used as a previous step to the complete seawater desalinization using reverse osmosis, due to the cost reduction.

(Key words: “desalinization”, “ceramic membranes”, “metallic impregnation”, “nanofiltration” and “seater demineralization”)

## DEDICATORIAS

A mis padres, a Lolita, Carmita, Jorge y demás seres queridos, que son mis ángeles desde el Cielo.

A mi hermano Jesús, a Lidia, Diana, Beto, José Luis, Violeta, Lucy, Anita, Paty, Abel, Ariadna, Nicole, Vero, Carlos, Marité y Héctor, que son mis ángeles en la Tierra.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Víctor, por su apoyo, disposición y entrega no sólo para realizar este proyecto, además por ser ejemplo de congruencia y ética hacia la investigación y de valores.

A Mabel por su tiempo, colaboración y dedicación al contribuir en este proyecto.

A mis compañeros de generación por las experiencias compartidas y la amistad lograda.

A Wilverth, Gustavo, Marisela y Yadira por su ayuda desinteresada, experiencia y paciencia.

Al resto de los maestros del programa de maestría, al personal del CEACA y Facultad de Química por su ayuda, conocimientos e interés.

A CONACyT y CONAGUA (proyecto CONACyT-CONAGUA 2008-85136) así como a la SEP (Proyecto PROMEP PTC-111-2008) por su apoyo.

## ÍNDICE

	Página
<b>RESUMEN</b>	<b>i</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>ii</b>
<b>DEDICATORIAS</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>viii</b>
<b>I.- INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>II.-REVISION DE LITERATURA</b>	
Propiedades físicas y químicas del agua.	<b>3</b>
Calidad de las fuentes naturales de agua.	<b>4</b>
El agua de mar.	<b>7</b>
El problema de la escasez de agua en el mundo.	<b>9</b>
Situación de la escasez de agua en México.	<b>13</b>
Desmineralización y desalinización del agua de mar.	<b>15</b>
Procesos de desmineralización con membranas.	<b>20</b>
Impacto ambiental de los procesos con membranas.	<b>29</b>
Membranas cerámicas y su modificación.	<b>31</b>
Mecanismo de impregnación de platino.	<b>34</b>
Mecanismo de impregnación de plata.	<b>35</b>
Estudios de desmineralización con membranas.	<b>36</b>
<b>HIPÓTESIS</b>	<b>38</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>39</b>
<b>III.-METODOLOGIA</b>	
Muestreo y caracterización de agua de mar.	<b>40</b>
Determinación de SDI.	<b>44</b>

Modificación de membranas cerámicas con metales	<b>45</b>
Evaluación operativa y del desempeño de sistemas de desmineralización con membranas	<b>49</b>
<b>IV.-RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSION</b>	<b>53</b>
<b>V.- CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS</b>	<b>73</b>
<b>VI.- RECOMENDACIONES</b>	<b>75</b>
<b>VIII.- LITERATURA CITADA</b>	<b>76</b>
<b>IX.- APÉNDICES</b>	
Apéndice 1 : Perspectivas y requerimientos de desalinización de aguas marinas y salobres en México.	<b>83</b>
Apéndice 2: Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-011-1994	<b>101</b>
Apéndice 3: NMX-AA-120-SCFI-2006	<b>110</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página	
2.1	Clasificación del agua de acuerdo a su concentración y uso.	7
2.2	Evolución de acuíferos con problemas de sobreexplotamiento o intrusión salina en México.	14
2.3	Evolución de consumo energético en plantas de desalinización por ósmosis inversa a nivel mundial.	19
2.4	Impactos ambientales de las plantas desalinizadoras y su mitigación.	30
3.1	Relación de métodos de análisis usados para la caracterización de agua de mar.	43
3.2	Características de diferentes capas de la membrana TAMI utilizadas de 5kD de diámetro de poro.	46
4.1	Valores de parámetros de campo de agua de mar de la Bahía el Potosí a lo largo de un año.	53
4.2	Análisis fisicoquímico y microbiológicos de agua de mar de la Bahía El Potosí a lo largo de un año.	54
4.3	Valores de parámetros de campo en zona muestreada (80 km de extensión) en otoño 2009.	55
4.4	Comparación de análisis fisicoquímico y microbiológico de agua de mar en la zona muestreada (extensión 80 km) para otoño 2009.	56
4.5	Comparación de los valores de metales pesados de agua de mar en la zona muestreada (extensión 80 km) para otoño 2009.	57
4.6	Comparación de análisis de agua de mar entre la zona de estudio del proyecto y los puntos muestreados en las penínsulas de Baja California y Yucatán.	58
4.7	Comparación temporal y espacial de los valores de SDI <sub>15</sub> .	58
4.8	Incremento en peso de las membranas cerámicas después del proceso de impregnación con platino y plata.	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	Diferentes tipos de filtración por membranas, por rango de diámetros de poro y presión aplicada.	20
2.2	Relación entre diferentes parámetros de membranas durante la operación de desalinización.	28
2.3	Esquema del mecanismo de impregnación de platino en membrana cerámica.	35
2.4	Formación del complejo plata-eteno.	36
3.1	Localización de la zona de estudio y distribución espacial del muestreo de agua de mar (Playa Blanca, Bahía del Potosí).	41
3.2	Localización de la zona de estudio y distribución espacial del muestreo de agua de mar (Troncones-Playa Blanca-El Calvario).	41
3.3.	Mapa donde se indican los puntos muestreados adicionalmente en los que se determinó la calidad del agua de mar.	42
3.4	Esquema del equipo utilizado para determinación de SDI.	45
3.5	Corte axial de una membrana TAMI de sustrato mesoporoso de un canal.	46
3.6	Impregnación de membranas cerámicas con platino.	47
3.7	Proceso de reducción de membrana impregnada con platino en horno tubular con atmósfera reductora de hidrógeno.	48
3.8	Equipo utilizado para calcinación de membrana impregnada con plata en horno tubular.	49
3.9	Diagrama del montaje del reactor a membrana.	50
4.1	Valores de recuperación de permeado con membranas cerámicas de un canal de diferente tamaño de poro sin tratamiento metálico.	60
4.2	Valores de recuperación de permeado con membranas cerámicas de 5 kD de un canal sin tratamiento metálico a diferentes presiones de operación.	61
4.3	Valores de remoción de sales para membranas cerámicas de 5 kD de un canal sin tratamiento metálico a diferentes presiones de operación.	61
4.4	Valores de flux con membranas de nanofiltración de un canal sin tratamiento metálico y de osmosis inversa a su presión óptima de operación.	62

Figura	Página
4.5 Remoción de sales de agua de mar para membranas cerámicas modificadas de 5 kD de un canal, impregnadas con platino.	63
4.6 Remoción de sales de agua de mar para membranas cerámicas modificadas de 5 kD de un canal impregnadas con plata.	64
4.7 Remoción de sales de agua de mar para membranas cerámicas modificadas de 5 kD de siete canales, impregnadas con platino a presión de 6 bar	65
4.8 Remoción de sales de agua de mar para membranas cerámicas modificadas de 5 kD de siete canales, impregnadas con plata a 6 bar de presión.	65
4.9 Comparación de los valores óptimos de remoción de SDT de agua de mar entre membranas cerámicas modificadas de 5 kD (RM-metal) y presión de 6 bar y el sistema de ósmosis inversa (OI) a 10 bar de presión.	66
4.10 Comparación del flux optimo en diferentes tipos de membrana cerámicas modificadas de 5 kD (RM-metal) a 6 bar presión y OI a 10 bar de presión.	67
4.11 Comparación de remoción de los dos principales aniones del agua de mar con membranas cerámicas modificadas de 5 kD (a 6 bar de presión) y membrana de OI (a 10 bar de presión).	68
4.12 Comparación de remoción de los principales cationes de agua de mar con membranas cerámicas modificadas de 5 kD (a 6 bar de presión) y membrana de OI (a 10 bar de presión).	68
4.13 Comparación de remoción de magnesio de agua de mar con membranas cerámicas modificadas de 5 kD (a 6 bar de presión) y membrana de OI (a 10 bar de presión).	69
4.14 Comparación de remoción de potasio y calcio de agua de mar con membranas cerámicas modificadas de 5 kD (a 6 bar de presión) y membrana de OI (a 10 bar de presión).	70
4.15 Comparación de consumo energético entre los sistemas de membranas cerámicas de 5 kD (RM-metal) y de OI.	71
4.16 Comparación de costo unitario de membrana en los sistemas de membranas cerámicas modificadas de 5 kD (RM-metal) y de OI.	71

## I.- INTRODUCCION

Actualmente existe una creciente escasez de agua dulce para las diversas actividades humanas, debido a su creciente demanda y menor disponibilidad causada por distribución desigual, sobreexplotación, contaminación y cambio climático. Es por ello que han surgido alternativas, para poder garantizar el abasto de agua. La desalinización es una de estas alternativas y consiste en reducir el contenido de sales o sólidos disueltos del agua salada o salobre hasta obtener un valor que permita su utilización para fines agrícolas, industriales o incluso como agua potable. La desalinización se puede hacer en varias etapas de desmineralización en las que se remueven algunos de los sólidos disueltos (ONU, 2009; National Geographic, 2010).

Las tecnologías para la desmineralización o reducción de los sólidos disueltos de aguas saladas o salobres pueden ser térmicas y por membranas. El uso de energía térmica involucra la separación del agua por evaporación y posterior condensación. Y en la separación por membranas, el agua salina o salobre pasa por una membrana que retiene las sales junto con parte del agua y dejando pasar la otra parte del agua con un contenido menor de sales. Esto se logra con membranas de poro muy fino como son de ósmosis inversa y nanofiltración y requieren para su operación de la aplicación de un diferencial de presión para que el agua pueda pasar por la membrana (Mazzoni et al, 2009).

La eficiencia de la filtración por membranas puede medirse por varios valores como flujo de permeado, porcentaje de rechazo de sales, porcentaje de recuperación de agua, permeabilidad, flux, presión necesaria y consumo de energía (Shirazi et al, 2010; Oh et al, 2009). Así mismo la calidad del agua permite predecir el funcionamiento de las membranas durante la filtración a través de su composición química, características fisicoquímicas y microbiológicas y el índice de densidad de lodos coloidales, SDI, por las siglas en inglés de silt density index (Yiantsios et al, 2005).

Las tecnologías por membranas usan menos energía y han estado en un proceso de mejora continua, por eso son las tecnologías más empleadas para la

desmineralización (Fritzmann et al, 2007). Las membranas empleadas en desalinización pueden ser de polímeros orgánicos o de materiales cerámicos inorgánicos. Las membranas inorgánicas tienen algunas ventajas como son una mayor facilidad de limpieza, mayor resistencia a los agentes químicos y desinfectantes y poder modificarse para mejorar su desempeño, sin embargo normalmente sólo llegan a separación parcial de las sales disueltas. (Al-Zoubi y Omar, 2009). Además la superficie de las membranas cerámicas en especial de nanofiltración pueden modificarse para, de manera selectiva, rechazar aniones o cationes (Velizarov et al, 2004).

La modificación de una membrana cerámica consiste en la impregnación y activación de algún elemento, metálico normalmente, de este modo se mejora el desempeño de la membrana sin perder su propiedad de porosidad, gracias a cargas eléctricas. Así se pueden retener iones aún siendo de diámetro menor al poro de la membrana (Zhang et al, 2009).

En este trabajo se evaluó la remoción de sólidos disueltos en agua de mar con membranas cerámicas modificadas. Se hicieron impregnaciones con dos metales -plata y platino- y se comprobó que las membranas impregnadas remueven una mayor cantidad de sólidos disueltos que la membrana sin impregnar.

La zona de muestreo elegida para el agua de mar usada en este estudio fue la Bahía El Potosí, Guerrero por ser una zona con poca influencia antropogénica y tener potencial turístico.

La metodología empleada consistió en muestreo, caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua de mar -incluyendo SDI-, realización de diferentes experimentos de filtración con membranas cerámicas sin modificar y modificadas y además comparación con ósmosis inversa. El desempeño de las membranas se determinó calculando valores de operación durante el filtrado, particularmente remoción de sólidos disueltos totales y la remoción de algunos aniones y cationes.

## II.- REVISION DE LITERATURA

### Propiedades físicas y químicas del agua.

El agua es la molécula formada por un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno, con un peso molecular de 18.015 uma. La molécula de agua presenta un momento bipolar de  $6.1042 \times 10^{-30}$  C·m (Coulomb·metro), que la hace un gran solvente y puede disolver electrolitos fuertes (compuestos iónicos o polares). Por su comportamiento como solvente universal, en estado natural está casi siempre acompañada con alguna otra sustancia. El origen de las sustancias que están disueltas en el agua puede ser geológico; por residuos de plantas y animales; por disolución de gases de la atmósfera; por reacciones en la misma agua o por residuos de actividades humanas (Guerrero, 1991).

Las soluciones acuosas presentan algunas propiedades diferentes al agua pura. Una de estas características modificadas o propiedad coligativa es la presión osmótica, la cual se define como un incremento en la presión que ejerce el soluto de una solución acuosa al estar en contacto con una membrana semipermeable y que permita el paso del solvente pero no del soluto. Por este fenómeno el agua pasa por la membrana desde una solución diluida a una solución concentrada. La presión osmótica se puede calcular para soluciones ideales por la fórmula:

$$\Delta\Pi = \sum_i J_i (n_i) RT/V \quad (\text{Shirazi et al, 2010})$$

donde  $\Delta\Pi$  es la Presión osmótica, R es la constante de los gases ideales, T es la temperatura, n es el número de moles de cada especie i, J es el factor de van Hoff de cada especie química i dado por la disociación iónica de cada especie y V es el volumen de solución ideal. La presión osmótica depende del tipo de sustancias disueltas, pero para aguas saladas y salobres se considera como una aproximación de  $75.84 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$  por cada 1,000 mg/L de sólidos disueltos totales (SDT).

Como todos los organismos, los seres humanos dependen del agua para su supervivencia, y además de consumirla es importante por otros usos como limpieza, procesos industriales, riego agrícola, o recreación. Por su ubicación y origen, el agua

se puede clasificar en agua de mar, aguas superficiales, agua subterránea y agua de lluvia.

### **Calidad de las fuentes naturales de agua.**

Los parámetros de la calidad de las fuentes naturales de agua, se pueden clasificar básicamente en tres rubros: propiedades físicas, composición química, y características particulares de acuerdo al origen y uso a que se destine.

Las propiedades físicas también incluyen parámetros termodinámicos y organolépticos, como olor, sabor, temperatura, punto de ebullición, punto de fusión, conductividad o sólidos sedimentables y otras como son:

a) Conductividad eléctrica (CE) es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. Es indicativa de la presencia de iones y está relacionado a la cantidad de sales disueltas. La conductividad se mide en Siemens/m (S/m) y existen algunas aproximaciones conociendo la conductividad para correlacionar los sólidos disueltos.

b) Turbiedad o turbidez es la opacidad o dificultad del agua para transmitir la luz debido a ciertos materiales en suspensión, coloidales e incluso microorganismos, de difícil sedimentación.

c) Sólidos suspendidos son todas las partículas no disueltas que se pueden separar por filtración o sedimentación.

d) Color mide el grado de absorbanza de alguna longitud de onda en particular, ya sea directamente o por comparación con un estándar (Rojas, 2002).

La composición química del agua, incluye todas las sustancias disueltas en el agua, como pueden ser cationes, aniones, gases y compuestos orgánicos, -como detergentes, grasas y aceites o carbono orgánico-. SDT son todas las sustancias presentes en el agua que no se pueden separar por filtración convencional por estar en solución verdadera.

Las aguas superficiales y subterráneas pueden ser salobres o dulces y normalmente tienen en solución los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ . El agua de lluvia puede tener mayoritariamente partículas y gases disueltos ( $\text{N}_2$ , Ar,

O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, entre otros). El agua de mar contiene una enorme cantidad de sustancias disueltas, pero los principales iones son Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>.

Existen valores como el análisis microbiológico del agua y parámetros o índices especiales (determinados directamente o a partir del valor de ciertas especies químicas), que indican el posible uso del agua así como el tratamiento que requiera para poder utilizarla. Algunos de estos valores son:

a) DQO, demanda química de oxígeno, es un parámetro que mide la cantidad de materia orgánica e inorgánica que puede ser oxidada por medios químicos. Es un indicador del grado de contaminación; se expresa en mg O<sub>2</sub> /litro. En aguas poco contaminadas se tiene un valor inferior a 50 mg/L

b) DBO<sub>5</sub>, indica la cantidad de materia susceptible de ser oxidada por medios biológicos, y también se utiliza para determinar su grado de contaminación principalmente de materia orgánica y el grado en que se puede tratar por medio biológico. Se mide como mg/L o ppm de O<sub>2</sub> consumidos durante un período de 5 días a 20 °C en la oscuridad. Como indicativo un agua pura tiene entre 0-20 mg/L (de consumo de oxígeno), un agua medianamente contaminada entre 100-500 y un agua muy contaminada más de 3000 mg/L.

c) Dureza es la presencia de sales de calcio y magnesio en el agua. La dureza disminuye la capacidad del jabón de producir espuma. Una alta dureza causa problemas de incrustación en calderas, tuberías, filtros y membranas. La dureza puede presentarse como carbonatos, bicarbonatos o alguna otra sal.

d) Análisis microbiológico es la determinación de algunas de las especies microbianas presentes, entre las más comunes se destacan coliformes totales y coliformes fecales, que indican la presencia de contaminación por aguas domésticas de origen antropogénico (Correa, 2007).

e) Índice de densidad de lodos coloidales o SDI, (silt density index, en inglés), es un parámetro que determina la capacidad del agua de obstruir una membrana de filtración. La obstrucción de la membrana ocurre por sólidos en suspensión o en estado coloidal. Este índice se determina por la diferencia entre el tiempo de filtrado de un volumen de agua después de la operación continua de filtrado después de un tiempo de operación determinado. El procedimiento para la



determinación de SDI está normado por la American Society for Testing and Materials (ASTM) bajo el número D 4189-82. Puede resumirse como sigue: una muestra de agua es filtrada a través de una membrana con tamaño de poro de 0.45  $\mu\text{m}$  y 47 mm de diámetro a una presión de 30 psi, registrando el tiempo que un volumen de 500 mL tarda en fluir a través de la membrana al iniciar la operación de filtrado, y volviéndose a determinar después de haber transcurrido un tiempo de operación constante de filtración. El  $\text{SDI}_{15}$  se calcula a partir del porcentaje de retardo en el tiempo, después de 15 minutos de operación -pero se registra el tiempo en que fluyen 500 ml después de 5 y 10 minutos, por si hubiera obstrucción del filtro que no permita determinar el tiempo a 15 minutos- con la fórmula:

$$\text{SDI}_{15} = (1 - t_1/t_2)100/ T,$$

donde  $t_1$  es el tiempo en que fluye el volumen de 500 mL al inicio de la filtración (con una membrana nueva);  $t_2$  es el tiempo de filtrado de 500 mL después del tiempo de operación constante con la misma membrana y T es el tiempo transcurrido de operación (15 minutos, a menos que no se alcance este tiempo y sería  $\text{SDI}_{10}$  o  $\text{SDI}_5$  en 10 o 5 minutos). Este índice debería tener valores de %, pero normalmente sólo se reporta su valor sin unidades (Yiantsios et al, 2005).

Hay muchos sistemas para clasificar la calidad de las aguas. Por ejemplo, se puede clasificar según el uso que se le vaya a dar como abastecimiento para consumo humano, para riego, vida acuática, entre otros. También se puede clasificar de acuerdo a su contenido de sustancias disueltas como agua dulce, salobre o salada. La Tabla 2.1 muestra los límites aceptados internacionalmente para clasificación de agua de acuerdo a su uso y contenido de sales (IMTA, 2007). En el caso de agua para consumo humano se pide en general una concentración de SDT menor a 1,000 mg/L, pero la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda concentración menor a 500 mg/L y así lo pide la normatividad en algunos países (ONU, 2009).

**Tabla 2.1** Clasificación del agua de acuerdo a su concentración y uso (IMTA, 2007).

Tipo de agua	Contenido de sólidos disueltos (mg/L)
Ultra pura (uso científico)	0.03
Pura (para algunas calderas)	0.30
Desionizada	3.00
Dulce para riego	500-1,500
Dulce potable	< 1,000 *
Salobre	1,000 - 10,000
Salina	10,000 - 30,000
Salada (o agua de mar)	30,000 – 50,000
Salmuera	50,000 – 150,000
Hipersalina	>150,000

\* Valor máximo aceptado internacionalmente, pero la OMS recomienda valores < 500, así como lo exige la normatividad mexicana para abastecimiento por organismos municipales.

## El agua de mar

El agua de mar es la principal fuente de agua en el planeta. La salinidad del agua del mar, que es su contenido de sales disueltas, es efecto de una extracción progresiva, estabilizada hace ya largo tiempo, de las sales procedentes de las rocas continentales debida a lavados por las lluvias. La salinidad no ha crecido significativamente desde hace miles de millones de años (Cifuentes et al, 1997).

El promedio de las sales disueltas en el agua de mar es constante, así como su proporción, pero las concentraciones delimitadas geográfica o temporalmente varían. La salinidad presenta variaciones cuando se comparan cuencas, latitudes, profundidades o estaciones del año. La evaporación produce una salinidad más elevada y así se tiene una mayor salinidad en las latitudes tropicales. La entrada de agua dulce disminuye la salinidad, como sucede en la proximidad de la desembocadura de ríos caudalosos y después de precipitaciones elevadas. Las aguas superficiales normalmente pueden tener niveles más altos de sal porque la evaporación hace que la concentración de sal aumente. El porcentaje medio que existe en los océanos es de 35 gramos por litro.

El agua de mar es una disolución de muy diversas sustancias, siendo la principal el cloruro de sodio, pero puede contener casi todos los elementos químicos naturales, muchos de ellos sólo como trazas. Seis elementos, en forma de iones, representan casi el 99% de la composición de solutos del agua de mar, los cuales son cloro, sodio, potasio, calcio, magnesio y azufre (como sulfato). Estos iones

presentes hacen que la salinidad se pueda medir a través de la conductividad eléctrica (a mayor salinidad, mayor conductividad). Pero para conocer la salinidad exacta del agua de mar es conveniente conocer la cantidad total de sólidos presentes o individualmente la concentración de las sustancias disueltas. La diferencia de salinidad entre masas de agua se combina con la de temperatura para producir diferencia de densidad, que resulta en la formación de las corrientes marinas o también llamada por ello circulación termohalina. La densidad típica del agua del mar suele ser de 1.0253 kg/L a 20°C, 1,0282 a -2 °C, 1,0281 a 0 °C y 1,0278 a 4 °C. La densidad depende de la salinidad y de la temperatura (Delcroix et al, 2005).

Como en el mar viven muchos seres vivos, se pueden encontrar diversidad de componentes orgánicos naturales en el agua. La mayoría de los nutrientes se transfieren hacia los océanos más profundos a medida que se hundan los organismos muertos de la superficie. En las capas más profundas la materia orgánica se remineraliza, es decir los nutrientes vuelven al medio en forma de solución o sedimento. Este proceso requiere oxígeno. Las concentraciones de nutrientes generalmente se incrementan con la profundidad, mientras la concentración de oxígeno disminuye, excepto en la superficie donde se tiene una gran cantidad de materia orgánica. Ésta procede tanto de plancton como de detritos de organismos marinos y terrestres y es un elemento constitutivo del agua de mar tanto en forma de material particulado como disuelto. En el caso del material disuelto, normalmente se trata de moléculas de alto peso molecular como azúcares, vitaminas, y muchas que más que solutos verdaderos son sustancias coloidales como polisacáridos, proteínas, urea y otras. Esto sin mencionar hidrocarburos en algunas regiones, que puede ser de origen natural o antropogénico (Yiantsios et al, 2005).

El silicio es otro elemento existente en el agua de mar, tanto en forma de materia suspendida y disuelta. El silicio es el constituyente principal del exoesqueleto de las diatomeas presentes en el fitoplancton y también de la sílice de las rocas y arena. Parte del silicio queda como partículas insolubles; pero otra parte se disuelve formando silicatos solubles (o ácido ortosilícico). El pH del agua de mar es

levemente básico, variando entre 7,5 y 8,4. El aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico puede producir una leve reducción del pH, que puede aumentar la concentración de silicatos y de iones calcio, magnesio, bario y estroncio, presentes como carbonatos y sulfatos en el sedimento marino y en conchas de moluscos (Den y Wang, 2008).

### **El problema de escasez de agua en el mundo.**

El agua en nuestro planeta representa sólo un 0.02% (aproximadamente 1,400 millones de km<sup>3</sup>) del total de la masa del planeta pero cubre aproximadamente las tres cuartas partes de su superficie lo que lo hace un 'planeta azul' visto desde el espacio. Y esta cantidad de agua es casi la misma que ha existido siempre y se mantiene constante por el ciclo hidrológico. Sin embargo, la mayor parte es agua salada (96.5%) o agua salobre (1%) (Oki y Kanae, 2006).

El agua dulce representa aproximadamente un 2.5 % del total (35 millones de km<sup>3</sup>) y de ese porcentaje el 69.5% se encuentra en forma de hielos en las zonas polares y altas montañas, aproximadamente un 30% se encuentra como aguas subterráneas (11 millones km<sup>3</sup>), 0.31 % está almacenada en aguas superficiales como lagos y ríos (100,000 km<sup>3</sup>, de los cuales aproximadamente el 9% corresponde a almacenamientos artificiales) y el resto es humedad en la atmósfera, humedad en el suelo y agua en los seres vivos (ONU, 2009) .

No toda el agua dulce es utilizable; el promedio de agua disponible y renovable para consumo humano es aproximadamente 42,000 km<sup>3</sup> al año -sin contar el agua de lluvia que se usa para riego de temporal, forestal, pastoreo o generación de electricidad-. Esto es debido a que una gran parte de las aguas subterráneas son fósiles o profundas y se formaron hace miles de años y normalmente no son aptas para consumo por su contenido en metales pesados. Mucha del agua no es utilizable también por ser necesaria para conservar los ecosistemas, por la dificultad de contener esas aguas y por no poderse utilizar por estar contaminadas. El almacenamiento del agua no se puede hacer fácilmente, por ejemplo del agua que corre por los ríos (45,000 km<sup>3</sup>/año) sólo se puede almacenar aproximadamente un 3.33% -1,500 km<sup>3</sup>/año- (Vörösmarty et al, 2000).

Todos los organismos, incluyendo a los seres humanos, requerimos agua para sobrevivir. Es por ello que la disponibilidad, en cantidad y calidad, de agua es esencial para el bienestar humano y su escasez en una localización y tiempo específicos es uno de los indicadores de mala calidad de vida. Los seres humanos utilizamos el agua para beber, pero también como medio de limpieza, riego para cultivos, solvente, refrigerante, para producción de electricidad y hasta para usos recreativos. La cantidad de agua que se utiliza para riego agrícola, uso industrial, doméstico y recreativo, es aproximadamente 3,800 km<sup>3</sup> al año, es decir menos del 10% del total de agua disponible almacenada y renovable por año tanto por ríos como aguas subterráneas (Vörosmary et al, 2000).

A pesar que globalmente se consume menos agua que la que se almacena, existe un problema de escasez debido a que no hay una distribución homogénea del agua, ni en tiempo ni en espacio. Existen zonas y/o periodos con muy poca agua disponible. El 50% del agua dulce disponible se concentra en siete países (Brasil, Rusia, Estados Unidos, Canadá, Indonesia, China y Colombia) mientras que otros países como Egipto o Sudáfrica la tienen que importar. Existen regiones en el planeta donde puede llover por días a niveles de 200,000 m<sup>3</sup>/año como en la India en temporada de monzones y otras zonas donde al año en promedio llueve menos de 2 m<sup>3</sup> como el desierto de Atacama en Chile. De igual manera la disponibilidad y consumo de agua varía, pues mientras los habitantes de algunos países desarrollados usan casi 400 L/día, en algunas regiones pobres subsisten con menos de 19 L/día (ONU, 2009).

El problema de escasez de agua en ciertas zonas o temporadas irá incrementándose en el futuro y expandiéndose a zonas donde actualmente no existe tal escasez. La población humana ha estado en constante crecimiento y con mayor desarrollo social y económico, haciendo crecer de igual manera la presión sobre este recurso. Esto genera mayores demandas de agua para uso industrial, agrícola y de servicio, así como por adaptación de nuevos estilos de vida. Además, muchas actividades humanas han tenido efecto negativo en el ciclo natural del agua ya sea directamente como contaminación, sobreexplotación y cambio climático, o indirectamente como cambios en el uso del suelo y alteraciones en las zonas de

captación de las cuencas, ocasionados principalmente por la deforestación, erosión y crecimiento urbano (National Geographic, 2010).

Los recursos hídricos están sometidos a una fuerte presión en diferentes lugares del mundo, debido a factores muy variados como aumento de la población mundial, aumento del nivel de vida –y en consecuencia aumento de la demanda individual tanto en calidad como en cantidad-, aumento de otras demandas como la industrial y la agrícola (esta representa más del 70 % de la demanda), pérdidas de agua en redes o servicios, contaminación de los recursos existentes y por cambios en las condiciones climatológicas. El consumo mundial de agua dulce se multiplicó por seis entre 1900 y 1995, es decir, aumentó más del doble que la población. En Medio Oriente y el norte de África hay problemas por la escasez de agua, pero en la primera mitad de este siglo se les unirá el África subsahariana, al duplicarse o incluso triplicarse su población y requerir mejores servicios.

Aproximadamente un tercio de la población mundial vive ya en países con déficit hídrico cuyo consumo supera en un 10% al suministro total de agua. En algunos países donde se abastecen de aguas subterráneas, la explotación de éstas se hace en cantidades mayores de las que la naturaleza puede reponer como China, Estados Unidos, Rusia, India, México y países de la península Arábiga. En algunos casos, el nivel estático de los mantos freáticos desciende entre 1 y 3 metros al año.

Existen problemas técnicos o económicos para incrementar el recurso natural del agua como la construcción de nuevas presas cercanas a los puntos de demanda y se añaden problemas sociales. En la mayoría de los países el agua ha sido responsabilidad del Estado: política e históricamente los grandes proyectos para aumentar el abastecimiento del agua han sido preferidos a las medidas para conservar el agua y mejorar la eficiencia en su uso. Todos los gobiernos del mundo han subsidiado el costo de abastecimiento del agua por ser un recurso estratégico y proteger a los usuarios. Cuando los gobiernos no pueden mantener estos subsidios, los costos del agua se elevan y pueden ser motivo de descontento social (Fritzmann et al, 2007).

La contaminación química tanto por productos agrícolas, industria y por aguas residuales urbanas representan un riesgo para la calidad del agua y para la

salud pública. Más de una quinta parte de los peces de agua dulce son vulnerables o se encuentran en peligro debido a la contaminación o a la modificación de su hábitat. Se calcula que en países en desarrollo, el agua no es apta para el consumo y las malas condiciones de saneamiento causan el 80% de las enfermedades.

El cambio climático –producido por deforestación, contaminación, emisiones de gases de efecto invernadero, agotamiento de suelos, entre otros factores- podría incrementar las diferencias entre regiones húmedas y regiones secas, produciendo más lluvias e inundaciones en zonas tropicales cercanas al mar y por el contrario disminuir las precipitaciones pluviales en regiones intercontinentales de zonas templadas e ir disminuyendo la capacidad de los cuerpos de almacenamiento de agua por el material acarreado por la erosión (National Geographic, 2010).

Si continúan las tendencias actuales, en el año 2025 dos de cada tres habitantes de nuestro planeta se podrían encontrar en una situación de escasez de agua. En manejo de agua se emplea el término de índice de escasez de agua que es la relación entre el agua consumida y el agua renovable por año. Un valor entre 0.3 y 0.6 se considera como estresante para la recuperación. (Karagiannis y Soldatos, 2008). Valores mayores a 0.6 se consideran como con riesgo de escasez futura. La barrera de 1.0 indica una escasez crítica y sugiere medidas severas para asegurar un desarrollo sustentable. Además de la escasez física del agua, en algunas regiones se reporta escasez económica de agua, debido a la falta de infraestructura para abastecimiento de agua aún existiendo el recurso. También se puede medir el índice como el número de personas que se abastecen por una unidad base (1 millón m<sup>3</sup>) de agua renovable por año. El límite para estrés es más de 500, para escasez es 1,000 personas y la barrera de situación crítica es de 1,700 personas.

Por ser un problema complejo, la sobreexplotación del agua necesita una solución integral y global. Las predicciones catastrofistas en el pasado sobre escasez de alimentos o sobrepoblación mundial, se han podido mitigar con medidas globales. De igual modo es necesario que se tomen medidas semejantes para que no ocurran tales presagios de desabasto de agua y evitar que pueda haber guerras por agua. Se deberán aplicar estrategias de ordenación en los planos internacional,

nacional y local. Las estrategias deberán comprender tanto sistemas de fijación de precios que promuevan la distribución equitativa como sistemas tecnológicos o políticos para el ahorro del agua, tanto en uso agrícola (el mayor consumidor), como industrial y doméstico, así como el tratamiento de las aguas residuales, declarar zonas de veda, mejorar la gestión de cuencas, aumentar la captación artificial, reducir la deforestación y mitigar el cambio climático, además de buscar nuevas alternativas de abasto. Todos estos avances tecnológicos deberán estar acompañados de campañas de sensibilización y movilización de la opinión pública para dar a conocer el alcance, las causas y las soluciones de las situación tanto presente como de posibles crisis futuras (Oki y Kanae, 2006).

### **Situación de la escasez de agua en México.**

El panorama en México tiene el mismo patrón que el mundial. En México, aproximadamente el 45% del agua para todos los usos proviene de aguas superficiales, el 27% de aguas subterráneas y el resto es de aprovechamiento directo de las lluvias (temporal). Sin embargo para el uso doméstico e industrial el 70% proviene del subsuelo y abastece a aproximadamente 78 millones de personas. La problemática del agua en nuestro país se puede agrupar en tres grandes rubros:

1) Distribución desigual del recurso en relación a las poblaciones y actividades humanas. La disponibilidad natural del agua en el país presenta marcados contrastes ocasionados por la intensidad variable con la que se da la ocurrencia del recurso y la ubicación de las diversas poblaciones; así como la heterogénea distribución de lluvias en las diferentes zonas y durante el año. El país se puede dividir en dos zonas: zona norte-centro y zona sur. En la primera zona la disponibilidad del recurso es del 32%, pero con una población que equivale al 77% y un PIB equivalente al 85%. En la región sur, la disponibilidad es del 68%, con un 23% de la población y sólo un 15% del PIB (CONAGUA, 2010).

2) Creciente deterioro de la calidad debido a contaminación y sobreexplotación. La contaminación ha provocado que aproximadamente 24% de los cuerpos superficiales se encuentren en el rango de contaminados a altamente contaminados, el 49% como medianamente a poco contaminados y solo el 27%



presente una calidad satisfactoria (del cual sólo el 5% se califica como excelente). Respecto al agua subterránea, el 80% presenta buena calidad, aunque se han identificado 40 acuíferos con cierta degradación y de los cuales 17 deteriorados o modificados por intrusión salina. La cantidad de acuíferos degradados ha aumentado en los años recientes como se ve en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2** Evolución de acuíferos con problemas de sobreexplotamiento o intrusión salina en México (CONAGUA, 2010).

Año	1975	1981	1985	2001	2003	2006	2008
Acuíferos sobreexplotados	32	36	80	96	104	101	101
Acuíferos con problemas de intrusión salina	N.R.*	N.R.	N.R.	17	17	17	16
Acuíferos con problemas de salinidad o salobres	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	13	17	32

\*N.R. No Reportado

3) Problemas de estrés hídrico en algunas regiones. El estrés hídrico de un acuífero es un parámetro para medir si la demanda es mayor que la cantidad disponible durante un periodo. Se considera que un país o región vive en estado de estrés hídrico si su agua renovable es de 1,700 m<sup>3</sup>/hab/año o menos. En México, la disponibilidad media per cápita de agua (cantidad promedio disponible al año dividido entre número de habitantes, sin importar el uso) a 2010 es 4200-4300 m<sup>3</sup>/hab/año, que aunque no es un valor de estrés, si es considerado bajo cuando es menor a 5,000 m<sup>3</sup>/hab/año. Sin embargo, si existe estrés en algunas zonas del país donde se tienen valores menores a 1,000 m<sup>3</sup>/hab/año. Un acuífero se considera sobreexplotado cuando la extracción es mayor en 10% que la recarga. Actualmente en el país, hay 653 acuíferos, de los cuales 101 se encuentran sobreexplotados. De ellos se extrae el 60% del agua subterránea para todos los usos y abastecen a muchas de las grandes ciudades del país. La sobreexplotación ha aumentado considerablemente en los últimos 40 años. Además, la deforestación contribuye a la menor infiltración de agua hacia los acuíferos y acelera la pérdida de suelos. (Correa, 2007).

La gestión de los recursos hídricos en México se complicará en los próximos años como resultado del crecimiento demográfico y del desarrollo económico, que típicamente incrementa el consumo per cápita. Al incrementarse la demanda de agua no sólo por el crecimiento de la población sino también en gran medida de la agricultura –por el crecimiento en la infraestructura de riego-, se configura un escenario de creciente escasez en algunas zonas del país, al combinarse con la menor disponibilidad natural. La disponibilidad del agua por habitante en México ha venido disminuyendo, en especial en los últimos 40 años y se prevé que siga disminuyendo. La disponibilidad media per cápita pasará de 13,319 m<sup>3</sup>/hab/año en 1960 a 3,793 en el año 2030, lo que generará una mayor escasez en las zonas áridas y semiáridas (Nava e Hiriart, 2008).

### **Desmineralización y desalinización de agua de mar.**

Uno de los recursos no convencionales que ayuda en la solución a la escasez de agua dulce, como parte de una fórmula integral, es la desmineralización de aguas salinas y salobres. La desmineralización o reducción de sales disueltas puede emplearse para mejorar la calidad de agua subterránea contaminada por algunos minerales –como en el caso de aguas fósiles- o contaminantes antropogénicos; para reutilizar aguas residuales como tratamiento terciario o incluso para obtener agua dulce a partir de agua de mar cuando llega a ser una desalinización (Fritzmán et al, 2007).

La desmineralización es el proceso de reducir el contenido de sales en general o de algunos minerales en particular disueltos en el agua, ya sea como un proceso parcial de desalinización o que permita el uso del agua para algún uso específico. Desalar o desalinizar es el proceso de eliminar las sales hasta obtener agua dulce y que pueda ser destinada a diferentes actividades como son riego agrícola, uso industrial o agua potable (Gabelich et al, 2007).

La desalinización es una tecnología que viene siendo ampliamente utilizada desde hace algunos años, tanto en la industria como en la agricultura o en el abastecimiento doméstico, pero limitado por factores económicos. El proceso de desalinización, como todo proceso industrial, depende de la energía y de acuerdo al

costo esta tecnología puede ir creciendo. En los últimos 25 años las tecnologías de desalinización han evolucionado en el consumo energético, de forma que este se ha reducido a un 20 o 25 %, puesto que las desaladoras actuales son mucho más eficientes energéticamente que las de hace unos años.

Las tecnologías para la desmineralización pueden clasificarse en térmicas y por membranas. La desmineralización por energía térmica involucra cambio de fase al primero evaporar el agua y posteriormente condensarla. En la separación por membranas, el agua salina o salobre se pasa por membranas de poro muy fino a presión; la membrana permite el paso de una parte del total de solución salina como agua pura y retiene a las sales en forma de solución concentrada. Los procesos por cambio de fase con energía térmica involucran un considerable gasto de energía, normalmente proporcionada por la quema de combustibles fósiles -petróleo principalmente- que además del efecto negativo al ambiente, económicamente tiene precios muy fluctuantes en el mercado. Estos sistemas fueron los pioneros en el campo de la desalinización y tras sucesivas mejoras pasaron de consumir industrialmente más de 20 kw/m<sup>3</sup> hace 25 años a 8 kw/m<sup>3</sup> con los procesos más recientes.

En cambio las tecnologías por membranas no son tan dependientes de las variaciones de los precios del petróleo y, aunque en un inicio eran tecnologías caras, han venido bajando su costo gracias al desarrollo de nuevas membranas que realizan la separación de sales mediante la aplicación de una presión o una carga eléctrica en lugar del vapor y que alcanzan rendimientos mucho más altos, tanto que los avances recientes permiten desalar agua de mar industrialmente con un consumo inferior a los 3 kw/m<sup>3</sup> y aguas salobres con consumos inferiores a 1 kw/m<sup>3</sup> al usar recuperadores de presión. (Greenlee et al, 2009)

A pesar de seguir siendo un proceso costoso, la desalinización reúne una serie de ventajas como son usar agua salada o salobre -recurso seguro, disponible, abundante y no condicionado a propiedad-, por ser un proceso de rápida instalación y puede ocasionar menores problemas ambientales y sociales. Pero también tiene ciertas desventajas como ser más caro que otros sistemas, requerir un nivel de capacitación más alto, no poder aprovechar toda el agua que entra al proceso y

producir residuos salinos que pueden tener un impacto ambiental. A través del tiempo se han perfeccionado las tecnologías existentes y se presentan como el gran reto del siglo XXI para contribuir a resolver problemas por falta de agua con menores costos e impactos (Pearce et al, 2004).

En los años 50's se iniciaron procesos de desalinización por tecnologías de destilación, en el Golfo Pérsico, una vez que las fuentes de agua dulce se comenzaron a agotar. A finales de los años 60's se comenzaron a trabajar pequeñas plantas desmineralizadoras de membranas de agua salobre en el estado de Florida. Se empezó a estudiar las membranas que suponen un avance y una reducción de costos para hacer la desalinización más asequible a los consumidores y se logró bajar el consumo energético de los 15 – 17 kw/m<sup>3</sup> que eran normales con las otras tecnologías hasta menos de la mitad.

En México existen plantas desaladoras para aprovechar tanto agua de mar como aguas salobres continentales. Esta infraestructura se halla distribuida en todo el país, pero principalmente consiste en pequeñas plantas desaladoras con fines turísticos, municipales (limpieza) y generación de electricidad. También se consideraban desaladoras algunas plantas para obtención de yeso, cal y sal, pero donde se usaba evaporación natural sin recuperación del agua principalmente en Baja California, Coahuila, Nuevo León, Estado de México y Distrito Federal (IMTA, 2007).

Se cuenta en Baja California Sur con la planta desalinizadora municipal más grande del país, en los Cabos, que tiene una capacidad instalada de 200 L/s de agua potable (17,280 m<sup>3</sup>/d) y abastece a una parte de Cabo San Lucas, para fines urbanos y turísticos. Y en febrero de 2010 se inauguró la segunda planta más grande, la de Litibú en Nayarit con una capacidad de 120 L/s. Ambas plantas trabajan con ósmosis inversa. El crecimiento del número de desaladoras se está realizando principalmente en la península de Baja California. Por el contrario en Quintana Roo, se ha frenado la construcción de plantas desaladoras pues la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Quintana Roo en la Riviera Maya, negoció en 2007 con los hoteleros para que se conecten a la red de agua potable

que construyeron; y los nuevos desarrollos están obligados a conectarse a dicha red de agua potable (Presidencia de la República, 2010).

Otra de las plantas proyectadas es la planta desaladora de Ensenada, Baja California, en la que se estima una inversión del orden de 352 millones de pesos y una capacidad de algo mayor a la planta de Los Cabos (250 L/s) y contribuirá al abasto de agua potable de una población de 96 mil habitantes. Debería haber iniciado su construcción en 2010, pues para 2013 el problema de abasto en esta región se estima sea muy grave. Como ha habido problemas políticos para aprobar la licitación de la obra, para 2011 se volvió a lanzar la licitación de construcción de la obra para iniciar su construcción ese mismo año -licitación 32130001-001-11- (Comisión Estatal de Agua de Baja California, 2011).

Además de las plantas mencionadas, existen planes para instalar plantas desaladoras en La Paz, B.C.S., Guaymas, Son. y Rosarito, B.C, para las cuales se han hecho los estudios correspondientes (Correa, 2007).

En el Apéndice I, se presenta información detallada de las tecnologías de desalación, el problema de escasez de agua en México y el mundo y la situación y perspectivas de la desalación de agua en México. La revisión ahí presentada se hizo como parte del proyecto de investigación del cual también surgió esta tesis -proyecto CONACYT-CONAGUA-2008 86136-.

El auge que han tenido las plantas desalinizadoras y especialmente las de procesos con membranas es gracias a la mejora tecnológica de los materiales de construcción, diseño de plantas más simple, aplicación de alta tecnología en equipos mecánicos que ha aumentado la eficiencia y a la utilización de la electrónica en el control y automatización de las instalaciones. Así es como se han conseguido importantes ahorros energéticos a nivel industrial como aparecen en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3** Evolución de consumo energético en plantas de desalinización por ósmosis inversa a nivel mundial (Fritzmann, 2007).

<b>Evolución de los consumos energéticos</b>		
<b>Año</b>	<b>kw/m<sup>3</sup></b>	<b>Euros/m<sup>3</sup></b>
1970	22	2.103
1980	18	1.803
1985	15	1.112
1988	13	0.102
1990	8,5	0.961
1992	7,8	0.751
1994	6,2	0.721
1996	5,3	0.691
1998	4,8	0.661
1999	4,5	0.528
2000	4,0	0.521
2001	3,7	0.504
2002	3,5	0.492
2003	3,1	0.468
2004	2,8	0.431
2005	2,6	0.412

La desalinización por sí misma enfrenta algunos retos como son la oposición social, el impacto ambiental ocasionado por sus residuos salinos, los valores de parámetros específicos de la calidad del agua obtenida, el alto costo de inversión, las situaciones de aguas en zonas internacionales, la afectación antropogénica de las aguas costeras (donde normalmente se instalarían las plantas desalinizadoras) o los casos no exitosos que ha habido por malas decisiones y que influyen a las decisiones futuras (Meerganz von Medeazza, 2005).

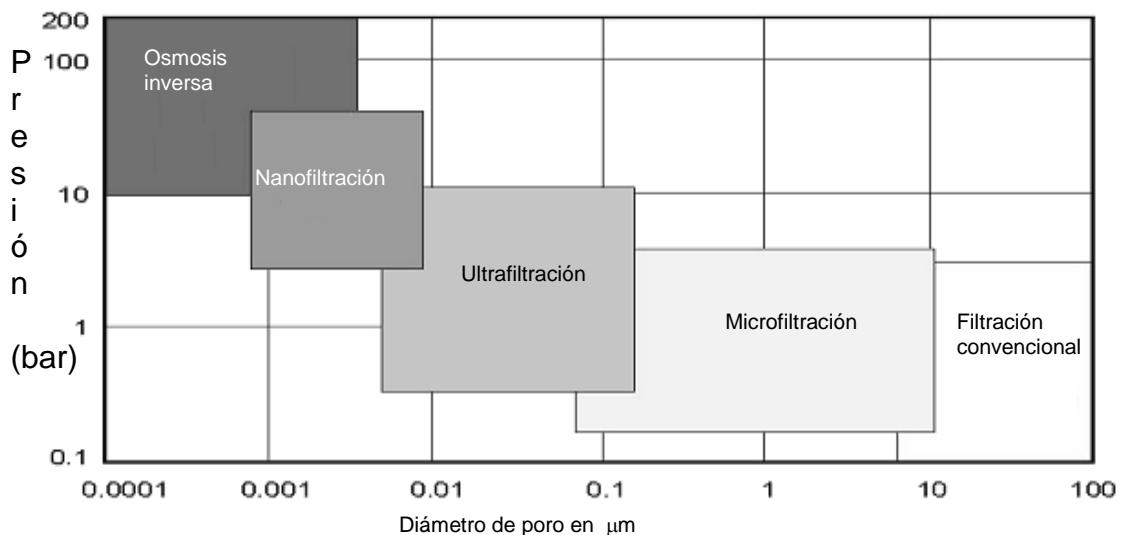
El futuro de la ósmosis inversa debe conquistarse sobre la base de mejoras en los diseños, en los equipos y las membranas, especialmente en estos últimos. Los principales problemas a los que se enfrentan las membranas en estos momentos son: ensuciamiento, baja permeabilidad, alto costo y alto consumo energético. Es por eso que las líneas de trabajo van encaminadas a trabajar con diámetros mayores pasando de 8" a 16" para reducir los costos de inversión, a

emplear Nanotecnología -que mediante la mezcla de materiales orgánicos y inorgánicos puede lograr mejor selectividad y menor ensuciamiento.

### Procesos de desmineralización con membranas.

Básicamente un proceso con membrana es una filtración a presión, que dependiendo del tamaño de los poros de la membrana, puede separar desde sólidos suspendidos hasta sólidos disueltos y que puede recibir diferentes nombres.

La microfiltración (MF) separa partículas entre 0.1 y 10  $\mu\text{m}$  (como sólidos suspendidos, materia coloidal e incluso bacterias), la ultrafiltración (UF) separa partículas entre 0.01 y 0.1  $\mu\text{m}$  (como bacterias, coloides, virus y grandes moléculas orgánicas solubles). La nanofiltración (NF), que se considera en el rango de 0.001 a 0.01  $\mu\text{m}$ , al igual que la ósmosis inversa (OI), que separa partículas entre 0.0001 y 0.005  $\mu\text{m}$ , son capaces de eliminar sólidos disueltos (Dow Chemical, 2010). Las membranas de NF normalmente rechazan moléculas con un peso molecular mayor a 200g/mol y la OI puede separar sales inorgánicas disueltas (incluso iones tan pequeños como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  o  $\text{Ca}^{2+}$ ). La OI es la más empleada por eliminar sólidos disueltos, produciendo prácticamente agua pura.



**Figura 2.1** Diferentes tipos de filtración por membranas, por rango de diámetros de poro y presión aplicada (Fritzmann,2007).

La OI se basa en la propiedad de ciertas membranas llamada semipermeabilidad, que permite el paso del agua y lo impide a las sustancias disueltas. En la ósmosis normal, el agua tendería a pasar de una solución diluida a una solución concentrada atravesando la membrana hasta lograr un equilibrio en la presión osmótica en ambas fases y lo haría de manera espontánea. En el caso de OI, se aplica una presión mayor a la presión osmótica para que el agua pase de la fase concentrada a la diluida. A mayor concentración de sales se necesita aplicar mayor presión (Dow Chemical, 2010).

En este tipo de separación, el agua a filtrar no va en forma perpendicular al medio filtrante, sino que lo hace de manera longitudinal. A esto se le llama flujo cruzado o tangencial y hace que el material eliminado no se queda en la membrana sino que al quedar retenido como solución concentrada es arrastrada y no se recupera el 100% de agua. Se tienen, entonces, dos salidas una de agua pura y otra de solución concentrada. A la entrada de agua con sales se le llama agua de alimentación, al agua libre de sales se le llama permeado o agua producto y al agua de residuo del proceso, se le llama agua rechazo o salmuera por tener un porcentaje alto de sales, que se puede recircular para tratar de recuperar más sales (Hydranautics, 2010).

Las membranas se pueden clasificar por el material de que están fabricadas y por la forma de la membrana. Por el material se pueden clasificar en poliméricas y en cerámicas. Las membranas de OI más populares son las compuestas de película delgada de poliamida (comercialmente conocidas como TFC, por las siglas del inglés de thin film composite) sobre una base de polisulfona y las de triacetato de celulosa (CTA, por las siglas en inglés de cellulose triacetate); las primeras membranas usadas eran de acetato de celulosa, pero ya no se usan. Por su forma se clasifican en tubulares, capilares, de fibra hueca y enrolladas en espiral (Mallevalle et al, 1998).

Las membranas cerámicas tienen algunas ventajas sobre las orgánicas como son estabilidad térmica, estabilidad fisicoquímica, resistencia a los microorganismos y posibilidad de limpieza con flujo invertido, por esterilización y por tratamientos químicos. Pero también tienen las desventajas de proporcionar una



superficie menor de contacto, tener poros mayores, ser frágiles y no resistir altas presiones. Algunos de los materiales cerámicos empleados para elaborar membranas son zeolita, sílica, zirconia, aunque normalmente se usa un sustrato de alúmina o sílica de porosidad alta cubierto con otro material de un poro menor (Duke et al, 2007).

Para 2006 el consumo de membranas está distribuido aproximadamente de la siguiente forma: membranas compuestas OI 85%, membranas compuestas de NF 3 - 5%, membranas de polisulfona de UF y MF 5 - 7% y otras membranas 3-5%.(Fritzmann et al, 2007)

Las membranas tubulares están situadas dentro de un tubo rígido hecho de un material poroso. Este material sostiene a la membrana de sólo pocos  $\mu\text{m}$  de espesor en las paredes internas del tubo. Debido a que las membranas de este tipo se localizan soportadas por el tubo y el flujo proviene del interior del mismo, la unión de la membrana fina a la capa que la sostiene no necesita ser muy fuerte. El tubo con las membranas tiene un diámetro de 5 a 15 mm. Por haber una alta velocidad de flujo y este va en forma tangencial a la superficie de la membrana las membranas tubulares presentan menos problemas de obstrucción. Su mayor inconveniente es que la proporción de la membrana es baja respecto al diámetro del tubo y se tiene poca superficie por módulo. Las membranas cerámicas son de tipo tubular. (Cheverreau et al, 2010).

Las membranas capilares están formadas por pequeños tubos con una membrana, que es suficientemente grande para resistir las presiones de filtración. El flujo a través de las membranas capilares puede ser tanto de dentro hacia afuera como de afuera hacia adentro. El diámetro de las membranas capilares es mucho más pequeño que el de las membranas tubulares, concretamente de 0.5 a 5 mm. Debido al menor diámetro, las probabilidades de obstrucción con una membrana capilar son mucho mayores, pero con la ventaja de presentar una superficie mayor.

Las membranas de fibras huecas tienen un diámetro inferior a 0.1  $\mu\text{m}$ . En consecuencia, las posibilidades de obstrucción de una membrana de fibras huecas son muy elevadas. Las membranas solo pueden ser usadas para el tratamiento de agua con un bajo contenido de sólidos suspendidos. La densidad de

empaquetamiento de una membrana de fibras huecas es muy alta. Las membranas de fibras huecas son usadas para NF y OI principalmente (Water Environment Federation, 2006).

Las membranas de espiral consisten en dos capas de membrana, situadas en un tejido colector de permeados. Este tejido está conectado a un tubo de desagüe de permeado sobre el cual se enrollan las membranas con su funda. Además existe una tercera capa que separa la membrana con su funda de otro módulo. Como no hay tubos se tiene una superficie de contacto muy grande. El agua entra por el separador pasa por toda la superficie de la membrana y el permeado pasa al tubo colector de desagüe. Las membranas de espiral son usadas solamente para aplicaciones de NF y OI (Mallevalle et al, 1998).

Durante la separación con membranas ocurren varios fenómenos en la superficie de la membrana y en el interior de sus poros, que son la polarización por concentración, obstrucción de poros y ensuciamiento biológico o formación de biopelículas. Por tanto la energía que se requiere para que exista el permeado debe considerar la resistencia total a vencer, que incluye la resistencia por polarización, resistencia por obstrucción de poros, resistencia por biopelículas, además de la resistencia propia de la membrana, la resistencia por la capa de material no filtrado retenido en la membrana y la presión osmótica normal en caso de membranas de poro fino (Shirazi et al, 2010).

La polarización por concentración se produce por la acumulación de material concentrado rechazado, pero soluble (que no pasó por la membrana) en las proximidades de la membrana. En el caso de membranas de OI y NF, estas partículas retenidas, dependiendo de su tamaño y tipo, afectan el proceso de separación debido al menor paso de agua por la membrana y al incremento de la presión osmótica. Esto provoca reducción en el rechazo de sólidos, además de favorecer la formación de precipitados que reduce la superficie de contacto efectiva de la membrana (Drioli et al, 2002).

Existe obstrucción de los poros por sólidos suspendidos en el agua, material coloidal del agua o incluso por precipitación de iones -en especial cationes divalentes como carbonato de calcio, sulfato de calcio, sulfato de bario, sulfato de

estroncio, hidróxido de magnesio y también sílice- al elevarse su concentración por polarización. Estos sólidos suspendidos o precipitados formados pueden ser removidos por el mismo flujo del concentrado en la membrana, si no se depositan en el interior de los poros. Sin embargo, si el concentrado es detenido por un poro de menor tamaño o adsorbido por cargas entre la membrana y el compuesto, la membrana quedará obstruida.

En el caso de la obstrucción biológica, la fuente principal en un proceso de desalación es el contenido de materia orgánica del agua a tratar así como al crecimiento de microorganismos ya sea en la solución, o, con mucho mayor efecto negativo, en la propia membrana (Fujiwara y Matsuyama, 2008).

El desempeño de la operación de OI para desalación o desmineralización se puede evaluar a través de diferentes parámetros directos como son uso de energía o presión aplicada, tasa de recuperación de agua dulce, porcentaje de rechazo de sales, flujo de agua, tiempo de vida, periodo transcurrido entre limpiezas y el costo de operación. Los factores limitantes que reducen la eficiencia de una membrana se pueden clasificar como deterioro propio de la membrana y como pérdida de presión efectiva. Algunos indicadores indirectos que permiten predecir el desempeño de OI, son turbidez, índice de densidad de lodos coloidales (SDI) o color y están relacionados con la cantidad de materia orgánica, de sólidos suspendidos y coloides, que producen obstrucción de la membrana. Los coloides son la fuente de obstrucción más peligrosa, dado que un análisis de agua estándar no revelará su presencia, por ser partículas más grandes que las moléculas disueltas, pero no lo suficientemente grandes como para ser vistas a través de un microscopio convencional. Por eso es que la medición de SDI permite predecir la obstrucción de la membrana de manera general. Cualquier coloide de menos de 1  $\mu\text{m}$  debe ser considerado como una amenaza para la membrana, y de manera indirecta un valor de SDI mayor a 5 se considera con este riesgo (Yiantsios et al, 2005).

Un proceso de desmineralización o desalinización por OI o NF contempla las siguientes etapas:

- Toma de agua
- Pretratamiento

- Elevación de presión
- Separación de sólidos
- Postratamiento del agua purificada
- Tratamiento y disposición del concentrado salino

En el caso de agua de mar, la alimentación al proceso se puede hacer por pozos costeros o directamente del mar. En el primer caso se tiene un agua de mejor calidad, por la filtración que ocurre al bombear el agua a través del pozo –un filtro natural de arena- pero implica mayores costos de inversión y espacio.

Para optimizar los procesos de desalinización con membranas, en particular por OI, es necesario que la solución salina o salobre llegue a la etapa de filtración, con el menor contenido de partículas y es por eso que es necesario que pase por un pretratamiento y así evitar tanto incrustaciones como obstrucción, y además prolongar la vida de la membrana. Si se elige el proceso adecuado, se podrá notar una mejora significativa en la operación de OI o NF. Los pretratamientos se pueden clasificar en: convencional, con membrana y mixto. El convencional consiste en coagulación (cloruro de hierro, es lo más recomendado), floculación y sedimentación o filtración, que también se le llama clarificación. Cuando se utiliza un proceso de membrana se utiliza microfiltración o ultrafiltración antes del proceso más fino de separación de sólidos disueltos (Lee et al, 2009).

El pretratamiento también incluye el uso de sustancias para regular el pH (normalmente ácido sulfúrico para evitar formación de carbonatos en pH alcalino), desinfección con cloro para reducir la formación de biopelículas en las membranas y el uso de antiincrustantes –sustancias que reaccionan con el calcio, magnesio y sílice evitando que se formen precipitados-. Hay que tener en cuenta que si se usa cloro para eliminar bacterias y mejorar el desempeño de filtración -previa o para desalinización-, es necesario eliminarlo con bisulfito de sodio antes de un que pase por las membranas cuando son poliméricas; en el caso de membranas cerámicas normalmente no es necesaria esta eliminación del cloro. (Brehant et al, 2002).

Una solución o agua de alimentación con parámetros adecuados para su operación, puede someterse al proceso de OI o NF para la remoción de sólidos disueltos, incluso sin pretratamiento si así lo sugiere la caracterización de dicha

agua. Como primer paso para la el proceso de separación con membranas, es necesario aumentar la presión hasta el valor necesario para la operación de la membrana, y puede variar desde 3 a 80 bar (agua de mar de alta salinidad para OI), dependiendo del tipo de agua a procesar y del tipo de membrana (Kumar y Pearce, 2006).

Algunos de los parámetros en la operación de membranas son:

a) Flujo. La cantidad de agua que entra al sistema cuando está colocada una superficie filtrante, en unidades de volumen o masa sobre tiempo. Si consideramos el ideal de una membrana con sus poros totalmente libres, y considerando el paso de agua pura por ella, el flujo es la cantidad de agua que pasa, en unidades de volumen/tiempo y se da por la ecuación.

$$Q = (\Delta P)A/(\mu R'), \quad (\text{Oh et al, 2009})$$

donde  $\Delta P$  es la caída de presión a través de la membrana (en la que se debe incluir la presión osmótica en caso de ósmosis) en unidades de presión como Pa;  $\mu$  es la viscosidad de la solución en unidades de Presión-tiempo, Pa-s por ejemplo; A es el área transversal al flujo y  $R'$  es la resistencia hidráulica de la membrana en unidades de recíproco de longitud,  $m^{-1}$  por ejemplo. Esta fórmula también sirve para calcular la resistencia hidráulica de la membrana y saber si la permeabilidad cambió durante la operación de la membrana.

b) La recuperación o el recobro es el porcentaje del flujo de agua producto, respecto al caudal que entra como agua de alimentación. En la operación de membranas no se puede alcanzar jamás el 100% de recuperación, por ejemplo en la desalinización de agua de mar se encuentra entre 35-55% de recuperación de agua mientras que para aguas salobres se puede alcanzar hasta un 85% de recuperación. El recobro,  $\eta$ , –como porcentaje- se calcula con la fórmula:

$$\eta = (Q_p/Q_a) \times 100 \quad (\text{Ramdhanie y Riverol, 2007})$$

donde  $Q_p$  es el flujo de permeado y  $Q_a$  es el flujo de alimentación.

c) El rechazo de una sustancia por una membrana es el porcentaje de esa sustancia que no se les permite pasar a través de la membrana y se calcula acuerdo a la ecuación:

$$R = [1 - (C_p/C_a) ] \times 100 \quad (\text{Hilal et al, 2005})$$

donde  $C_p$  y  $C_a$  son las concentraciones de soluto en el permeado y en la alimentación respectivamente.

d) El paso de sal es la cantidad de sal que pasa por la membrana, es decir es el complemento del rechazo (100%-Rechazo) para una de las especies disueltas en el agua.

e) El flux, es la capacidad de flujo del permeado a través de la filtración de flujo cruzado, dada en términos de volumen por tiempo y área de filtración de la membrana, generalmente en litros por metro cuadrado y por hora ( $L/m^2h$ ) o galones por pie cuadrado por día (gfd). Se calcula por la fórmula:

$$J = Q_p / A \quad (\text{Oh et al, 2009})$$

donde  $Q_p$  es el flujo de permeado en unidad de volumen por tiempo y  $A$  es el área de la membrana.

f) Permeabilidad es un índice que engloba al flux y a la presión y es el volumen de agua (solvente) que atraviesa la membrana por unidad de superficie, por unidad de tiempo y por unidad de presión (diferencia de presión) a ciertas temperatura y salinidad determinadas y constantes.

$$P = J / \Delta P \quad (\text{Dow Chemical, 2010})$$

La inversión y costos de operación de procesos de membrana están directamente en relación del caudal de permeado. A mayor flujo volumétrico de solución que atraviesa la membrana y se obtiene como permeado, menor será el área de membrana necesaria para proporcionar el caudal necesario de diseño y por tanto menor costo de inversión. Y además, también los costos de los equipos (bombas, instrumentación, espacio, construcción, etc.) serán menores y también el costo de la superficie de membrana a reemplazar una vez llegado a su fin de vida (Nordin y Jönsson, 2009).

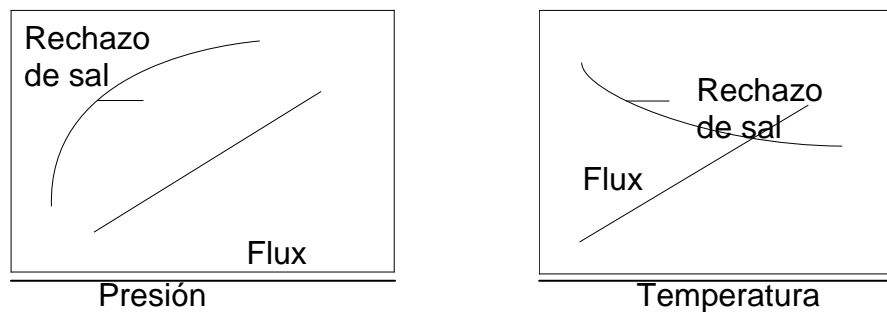
La energía empleada para hacer pasar el agua a través de la membrana se calcula por unidad de volumen de permeado. Para su determinación se emplea la definición de potencia que es la cantidad de energía eléctrica por unidad de tiempo y despejando energía se obtiene  $W = (P_o)t$ , donde  $W$  es la energía eléctrica en unidades de energía como Joule o kwatt-hr,  $P_o$  es la potencia eléctrica en unidades de potencia como watt o kwatt y  $t$  es el tiempo. Dividiendo ambos términos entre el

volumen de permeado (V) y considerando que el caudal de permeado es  $Q_p = V / t$ , se obtiene la fórmula siguiente para la energía utilizada por unidad de volumen:

$$E = P_o / Q_p,$$

siendo E el consumo de energía por unidad de volumen de filtrado,  $P_o$  la potencia del equipo de bombeo y  $Q_p$  el caudal de permeado.

Todos los factores de desempeño están afectados por las condiciones de operación, como son presión, temperatura y concentración del agua de alimentación. En la Figura 2.2 se muestran algunas relaciones que se presentan entre dos variables de desempeño de la operación de membranas de OI (rechazo de sal y flux) contra algunas variables como son temperatura y presión. El flux varía proporcionalmente a la presión y a la temperatura. En cambio el rechazo de sales es proporcional a la presión hasta cierto punto donde ya no se incrementa y depende únicamente del tipo de membrana; y su comportamiento es inversamente proporcional a la temperatura (Gray et al, 2007).



**Figura 2.2** Relación entre diferentes parámetros de membranas durante la operación de desalinización.

Aún con un excelente pretratamiento las membranas de OI y NF van a sufrir algún tipo de obturación, con la baja en el flux, flujo, rechazo de sales y con la necesidad de aumentar la presión y los costos. Además algunas obstrucciones de las membranas con el tiempo se pueden hacer irreversibles y dañar la membrana definitivamente. Para restablecer las condiciones de operación y evitar daño permanente a la membrana, es necesario limpiar las membranas. Las operaciones intermitentes, la limpieza química, un pretratamiento inadecuado, la formación de una biopelícula en la membrana, las condiciones de operación y la existencia de

trazas de productos químicos a pesar del pretratamiento son las causas por las que una membrana finalmente se deteriora (Macedonio et al, 2007).

Cada tipo de membrana tiene algunas ventajas y desventajas. Por ejemplo las membranas de celulosa y las cerámicas se pueden esterilizar con cloro pero las de poliamidas no, y por eso se pueden formar biopelículas. Las membranas de poliamida y las cerámicas son resistentes al ataque bacteriano como tal y las de celulosa no. Las membranas de poliamida y cerámicas se pueden usar en un rango de pH amplio (3-11), mientras que las de celulosa no se pueden utilizar a pH debajo de 4. Las poliméricas ofrecen mayor resistencia a la presión que las cerámicas. Una membrana ya deteriorada se puede disponer como residuo no peligroso, por no contener sustancias dañinas al medio ambiente.

El agua obtenida en un proceso de desalinización puede no ser potable o utilizable ya sea porque su nivel de sales es bajo y, tiene una palatabilidad (sabor) a veces no aceptable, índice de Langelier negativo que la hace corrosiva o porque todavía tiene una concentración de algún elemento fuera del límite como a veces sucede con el boro. Por estos dos factores es necesario que el agua producto de la OI sea sometida a tratamientos o postratamientos para su utilización (Guler et al, 2010).

### **Impacto ambiental de los procesos de desalinización con membranas.**

El impacto ambiental del proceso de desalinización de agua de mar debe verse desde tres enfoques:

1) Suministro de agua. Es benéfico por la sustitución de explotación de este recurso proveniente de fuentes superficiales o subterráneas, que pudieran estar limitadas, con el consecuente incremento de áreas verdes por irrigación y mejora del suelo. También tiene un punto negativo que es tener un costo más elevado, pero que puede mitigarse si se usara una valoración real del recurso, lo cual es difícil de determinar (Meerganz von Medeazza, 2005).

2) Como un proceso industrial con sus consecuencias como son el uso de energía para el proceso, posibles generaciones de gases efecto invernadero (directa o indirectamente), modificación de uso de suelo, generación de ruido, disposición de



materiales de construcción y operación, mayores fuentes de empleo y redistribución de población hacia zonas costeras. Estos impactos ambientales se pueden clasificar en tres categorías como se ve en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4** Impactos ambientales de las plantas desalinizadoras y su mitigación (Fritzmann et al, 2007).

Actividad	Impacto*	Origen	Mitigación
Uso de desinfectantes	A	Compuestos de cloro. Reacciones con orgánicos.	Desinfección con UV. Reducción y control.
Metales pesados	M	Corrosión de los equipos	Diseño adecuado y uso equipos resistentes.
Uso de aditivos: Eutrofización Toxicidad Cambio pH	A B B	Antiincrustantes. Anticorrosivos. Ácidos.	Reducción y tratamiento. Productos no tóxicos. Reducción y tratamiento.
Contaminación de aire: Lluvia ácida E. invernadero Polvos	B M M	Quema de combustible	Uso de energía limpia, cogeneración electricidad, tratamiento de emisiones.
Sedimentos	M	Movimiento arena en excavación.	Reducción de afectación.
Ruido	B	Construcción y operación.	Reducción, uso de equipos bajo nivel ruido.

\*A significa alto impacto, M mediano y B bajo impacto

3) Afectación directa a los ecosistemas marinos tanto por la extracción del agua de alimentación como por la generación de la salmuera, altamente concentrada en sales y de otros residuos como las soluciones limpiadoras o las usadas en pretratamiento y postratamiento. La extracción de agua se deben hacer con la menor turbulencia posible para que no haya afectación, esto se logra con tomas de diámetros grandes, con orientación alejada al ecosistema costero y con filtros trampas para evitar dañar organismos.

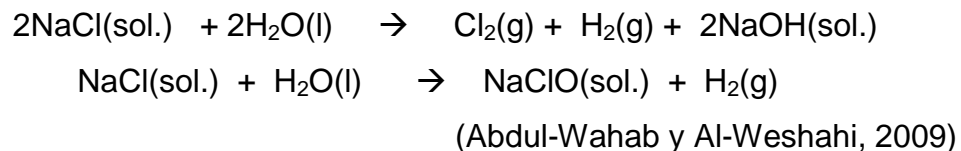
Para las aguas de pretratamiento, postratamiento y de limpiezas diarias que contienen alto contenido de sólidos, biológicos y minerales normalmente se tienen que tratar como cualquier agua residual disminuyendo al máximo su generación y con un tratamiento antes de su vertido al mar. Y además se generarían lodos como residuos peligrosos.

Para el caso de la salmuera o agua de rechazo, hay que considerar que tiene restos de algunos productos (como antiincrustantes) y que tiene entre 2 y 3 veces la concentración del agua de mar en sales disueltas y por tanto es más densa. Si se vierte directamente al mar, tenderá a difundirse hacia el fondo marino, que es donde mayor biota existe. Es por esto que para disminuir el impacto de salmueras se tienen tres procesos: vertido de salmuera con gran dispersión y dilución, concentración de la salmuera para recuperación de sales y electrólisis de la salmuera para producir cloro o hipoclorito.

En el caso del vertido, aún con las mejores técnicas de dispersión de la salmuera, con difusores eficientes, hay evidencia de que aumenta la salinidad en el fondo, por lo que se deberán hacer los estudios de impacto sobre cada ecosistema buscando no dañar especies sensibles como han demostrado ser los equinodermos.

En el caso de recuperar las sales por evaporación o destilación por membranas y posteriormente lograr la cristalización de la solución supersaturada, esto tiene un costo que pudiera disminuirse si se pudiera incrementar la eficiencia de la operación con membranas y llegar a salmueras con concentraciones cercanas al punto de saturación, para así reducir la cantidad de energía empleada. El producto obtenido necesita purificarse para utilizarse en alimentos, pero se puede utilizar para industria (Hajbi et al, 2010; Heijman et al 2009).

Para el caso de la electrólisis, la tasa de producción es baja y se requiere de mucho voltaje para operar con alto rendimiento, pero puede ayudar para bajar un poco el volumen de salmuera a tratar por los dos métodos anteriores y los productos se pueden utilizar para desinfección. Las reacciones que ocurren en este proceso son:



### **Membranas cerámicas y su modificación.**

Las membranas cerámicas consisten en una pequeña capa de poro muy fino sobre un sustrato cerámico poroso, normalmente de alúmina ( $\alpha$  o  $\gamma$ ), sílica u

óxido de zirconio. Las membranas cerámicas más finas normalmente son de nanofiltración y tienen propiedades intermedias entre la ultrafiltración y la OI, utilizando baja presión, altos flujos aunque con un rechazo de sólidos disueltos menor a OI (Hilal et al, 2005).

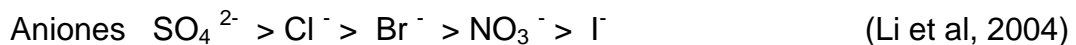
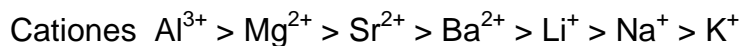
Las membranas cerámicas ofrecen las ventajas de mayor estabilidad y menor grado de obstrucción en soluciones con materia orgánica, en comparación con las membranas poliméricas para separación de iones en soluciones. En algunos estudios se ha encontrado que en soluciones diluidas con iones  $\text{Na}^+$ , se logra una separación casi completa. Pero cuando existen otros iones, el porcentaje de rechazo se reduce aún siendo especies semejantes, esto se explica por el tamaño dinámico aparente de los iones al transportarse, que es diferente al tamaño del ion hidratado en solución (Mazzoni et al, 2009).

Un ion en solución está en equilibrio con una cantidad de moléculas de agua unidas a él (número de hidratación, NH), pero al transportarse por una membrana de poros pequeños sólo una parte de estas moléculas está lo suficientemente unidas (número dinámico aparente de hidratación, NDAH) permitiendo el paso de algunos iones por el poro y/o mayor cantidad de moléculas libres de agua. Un ejemplo es un proceso de ósmosis inversa con membranas de zeolita MFI que se produce no sólo por retención de iones hidratados que no pasan por los nanoporos de la membrana cerámica, sino por un mecanismo de interacción iónica entre la membrana y el ion en solución cuando pasa por poros intercrystalinos de mayor tamaño, en especial si esta membrana fue tratada con algún metal pesado que incrementa el rechazo de una sal por cargas electrostáticas (Li et al, 2004).

Una membrana con poros de 0.5 – 0.6 nm puede tener porcentajes de rechazo no muy altos pero sí significativos para iones pequeños como NaCl (con una tasa de rechazo del 21% ) pero también hay una baja en la permeabilidad. Los iones se retienen por otro mecanismo diferente al tamaño de partícula y es la interacción iónica de los iones con la membrana cerámica (Al-Zoubi y Omar, 2009).

En los microporos existe interacción iónica de los cationes con iones negativos de la membrana que reduce su paso, pero permite el paso de agua, de acuerdo a la densidad de carga o número de oxidación del ion ( $+3 > +2 > +1$ ). Aún

más, en los poros intercristalinos de mayor tamaño, se sustituyen átomos de la membrana y se forma una doble película de carga negativa y positiva que aumenta la hidratación dinámica (Velizarov et al, 2004). Es por eso que la permeabilidad de iones por poros intercristalinos es proporcional al tamaño del ion con NDAH y la movilidad del agua en iones con NDAH alto también se ve reducida bajando la permeabilidad para este ion. Existe una serie liotrópica (relacionada al aumento del rechazo de los iones) que predice el comportamiento de rechazo de aniones y cationes en membranas con el siguiente orden:



Sin embargo, esto es una generalización y existen numerosos casos de excepciones por interacciones entre soluciones de varios iones, complejación y cargas de la membrana.

Una membrana tratada con metales incrementa el número de cargas y con ello es posible aumentar el rechazo de algunos iones y mantener o incluso aumentar la permeabilidad (Zhang et al 2009).

Los elementos fijados a una membrana cerámica para usarse en fase acuosa deben ser resistentes al ataque químico, mantener su actividad química y ser mecánicamente resistentes. Los más recomendados son metales nobles, precisamente por ser muy inertes, y óxidos de ciertos metales. Los óxidos metálicos como el  $\text{CeO}_2$ , son generalmente menos activos que los metales nobles, pero conservan más tiempo su actividad, es decir son más resistentes al envenenamiento. Para los metales nobles, la actividad sobre membranas de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) o titania ( $\text{TiO}_2$ ) no es igual y en orden creciente es la siguiente:



Existen diferentes tipos de configuración para depositar el metal en una membrana cerámica. Puede aplicarse el metal directamente sobre la membrana inerte, o puede formarse una mezcla entre la membrana y el metal para depositarse directamente en el soporte de la membrana. El tratamiento superficial de una membrana de cerámica se hace primero impregnando la membrana con alguna solución del metal a depositarse o precursor de este metal. Para esta operación se

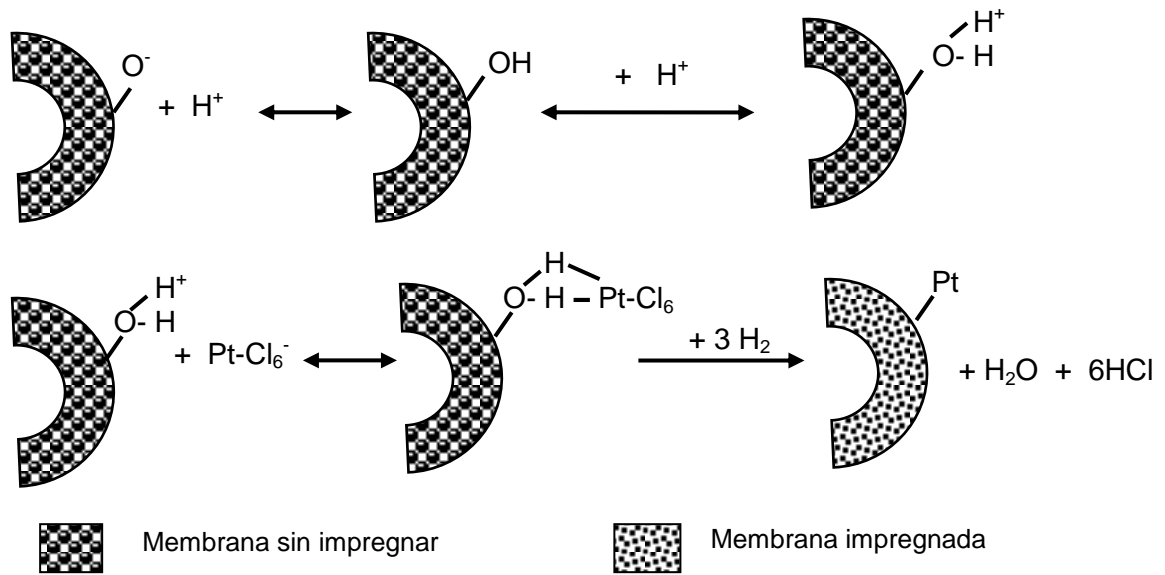
debe hacer la mejor dispersión de los átomos del metal sobre la superficie del sustrato y repartir el metal de manera homogénea. Esto se hace en fase líquida o seca, pero se prefiere en fase líquida por crear uniones entre el soporte de la membrana y el complejo metálico por interacciones de tipo electrostático.

Una vez impregnada, la membrana se somete a calcinación a 300 °C para eliminar restos de materia orgánica del compuesto metálico y dejar únicamente el metal depositado en la cerámica y que quede depositado en la estructura cristalina de la cerámica en su forma reducida. Muchas veces se requiere un agente reductor durante la calcinación para asegurar que el metal quede en su forma reducida. En algunos materiales cerámicos puede haber cambio de fase con la temperatura y podría variar la estructura cristalina. Se debe trabajar a temperaturas menores de 1000°C pues a temperaturas cercanas a esta temperatura la estructura de las cerámicas pierde su porosidad al vitrificarse (Triwahyono et al, 2006).

### **Mecanismo de impregnación de platino.**

El depósito de platino en una membrana cerámica se hace utilizando una sal de este metal directamente sobre la membrana y creando un ambiente reductor con atmósfera de hidrógeno durante la calcinación.

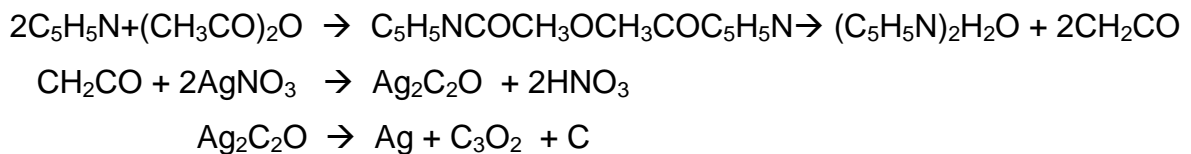
Primero se trata de una etapa de difusión en la que la solución del ácido hexacloroplatínico ( $\text{H}_2\text{PtCl}_6$ ) esté en contacto con la membrana hasta la saturación de la misma. Posteriormente se debe fijar el precursor. Los iones hidroxilo  $\text{OH}^-$  del sustrato de material cerámico ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  y/o  $\text{TiO}_2$ ) en medio ácido le confieren un carácter anfótero que hace que se ionice, aumentando las cargas positivas de la superficie. Posteriormente se crea una interacción electrostática entre este soporte ionizado y el ión cloro-platino que se va a depositar. Una posterior reducción con hidrógeno permite la formación de la partícula metálica activa. Este mecanismo se explica en la Figura 2.3.



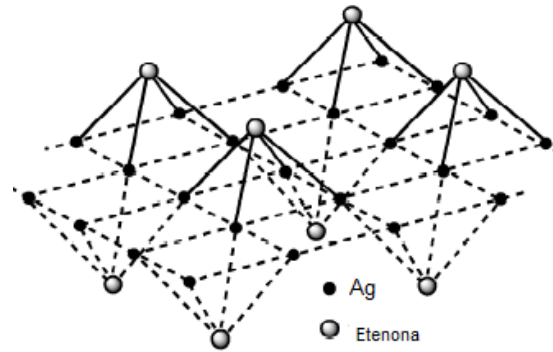
**Figura 2.3** Esquema del mecanismo de impregnación de platino en membrana cerámica (Pérez et al, 2001).

### Mecanismo de impregnación de plata.

La inmovilización de plata en una membrana cerámica se realiza formando una película de polímero de plata-etenona ( $\text{Ag}_2\text{C}_2\text{O}$ ) que se forma al hacer reaccionar acetato o nitrato de plata con anhídrido acético en solución de piridina y su posterior calcinación para depositar la plata metálica sobre la membrana de acuerdo a las reacciones siguientes:



El esquema de formación de la película del polímero de plata-etenona, antes de la reducción por calcinación se muestra en la Figura 2.4.



**Figura 2.4** Formación del complejo plata-etenona (Triwahyono et al, 2006).

### **Estudios de desmineralización con membranas.**

Se han realizado varios estudios de reducción de desmineralización con membranas de nanofiltración, pero principalmente han utilizado membranas poliméricas en sus investigaciones y han usado soluciones de baja concentración. Velizarov et al (2004) reportan remociones de compuestos individuales entre 25 y 80% usando aguas salobres de baja concentración con membranas poliméricas. Hilal et al (2005) lograron valores de remoción de iones divalentes arriba del 50% con concentraciones muy bajas de salinidad y la remoción bajó a valores menores a 10% cuando utilizaban concentraciones mayores (25000 mg/L) empleando membranas poliméricas. Deon et al (2007) obtuvieron remociones cercanas al 20% usando soluciones muy diluidas de NaCl con membranas cerámicas a presión de 5 bar. Gabelich et al (2007) obtuvieron remoción de iones divalentes como  $\text{Ca}^{2+}$  por arriba de 97% empleando membranas poliméricas en agua salobre como una etapa previa a la desalinización total. Al-Zoubi y Omar (2009) usaron soluciones de concentraciones altas ( $> 20,000$  mg/L) de compuestos iónicos individuales con membranas poliméricas y obtuvieron remociones entre 15-60% según el ión y la presión. Mazzoni et al (2009) usaron membranas cerámicas con soluciones de baja concentración de compuestos iónicos individuales y alcanzaron valores de 50% para  $\text{CaCl}_2$  y 25% para NaCl. Lee et al (2011) reportan remociones arriba del 90% para sales usando soluciones de baja concentración ( $< 0.1\%$ ) con membranas cerámicas de zeolita pero con reducción significativa en el flujo y con necesidad de presiones muy altas. Cheverau et al (2010) encontraron que las membranas cerámicas que

emplearon en experimentos para remoción de sales de magnesio, quedaban cargadas positivamente por el catión y esto afectaba las posteriores filtraciones y sugieren impregnar las membranas con metales para evitar este fenómeno. Yang et al (2009) emplearon membranas poliméricas de ósmosis inversa impregnadas con plata como un auxiliar para reducir el desarrollo de obstrucción bacteriana y encontraron que el flux mejoraba al usar este metal.



## **HIPOTESIS**

La desmineralización de agua de mar mediante membranas cerámicas modificadas con plata y modificadas con platino son procesos que incrementan la remoción de sólidos disueltos totales.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la desmineralización de agua de mar, como reducción en la concentración de sólidos disueltos totales, mediante membranas cerámicas modificadas empleando agua procedente de la bahía El Potosí, Guerrero.

### **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Caracterizar el agua de mar de la región seleccionada mediante parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, en un ciclo anual.
- Modificar la carga superficial de membranas cerámicas de nanofiltración con metales plata y platino.
- Comparar la operación de desmineralización de agua de mar empleando diferentes membranas.
- Medir la remoción de algunos aniones y cationes empleando membranas cerámicas modificadas.

### III.-METODOLOGIA

Para lograr los objetivos planteados se siguieron los siguientes pasos:

A) Muestreo y caracterización fisicoquímica y microbiológica de agua de mar en la región seleccionada para este estudio (Playa Blanca en la región del Pacífico tropical, localizada en la bahía El Potosí, Guerrero). En esta caracterización se incluyó la determinación de SDI (silt density Index en inglés) o índice de densidad de lodos, como parámetro para predecir el obstrucción de las membranas, durante la posterior filtración.

B) Modificación de membranas inorgánicas con los dos metales seleccionados, plata y platino por impregnación en fase líquida y calcinación.

C) Evaluación operativa y de desempeño de sistemas de desmineralización con membranas inorgánicas normales, modificadas y su comparación con membranas de ósmosis inversa.

#### **Muestreo y caracterización de agua de mar.**

Se evaluó la calidad del agua de mar en un punto llamado Playa Blanca ( $17^{\circ}34'45''$  N y  $101^{\circ}27'97''$  O) en la región Pacífico tropical y localizado en la bahía El Potosí, municipio de José Azueta, Guerrero. Se seleccionó este punto por ser una región donde se puede instalar una planta de desalinización por su potencial de explotación turística, carecer de infraestructura para distribución de agua potable y que este sitio no tiene manifestaciones de impacto antropogénico.

El muestreo se hizo en diferentes temporadas y basándose en el punto indicado se realizó un muestreo compuesto en diferentes puntos de esta zona, ubicados sobre la costa del Océano Pacífico. Estos puntos cumplieron con el criterio de no presentar descargas de origen antropogénico. El muestreo para análisis fisicoquímico se realizó en base a la NOM-014-SSA1-1993. Para las muestras de análisis bacteriológico se siguieron los lineamientos de la NMX-AA-120-SCFI-2006. Esta norma se presenta en el Apéndice 3.

De este modo se obtuvo un perfil temporal de la zona a lo largo de un año iniciando en julio 2009 y terminando en junio 2010.

Las muestras compuestas se tomaron a lo largo de la bahía, en puntos separados a una distancia de 5 km al norte y 5 km al sur del punto con coordenadas indicadas en el párrafo anterior, para obtener un perfil espacial de la bahía como se muestra en la Figura 3.1.



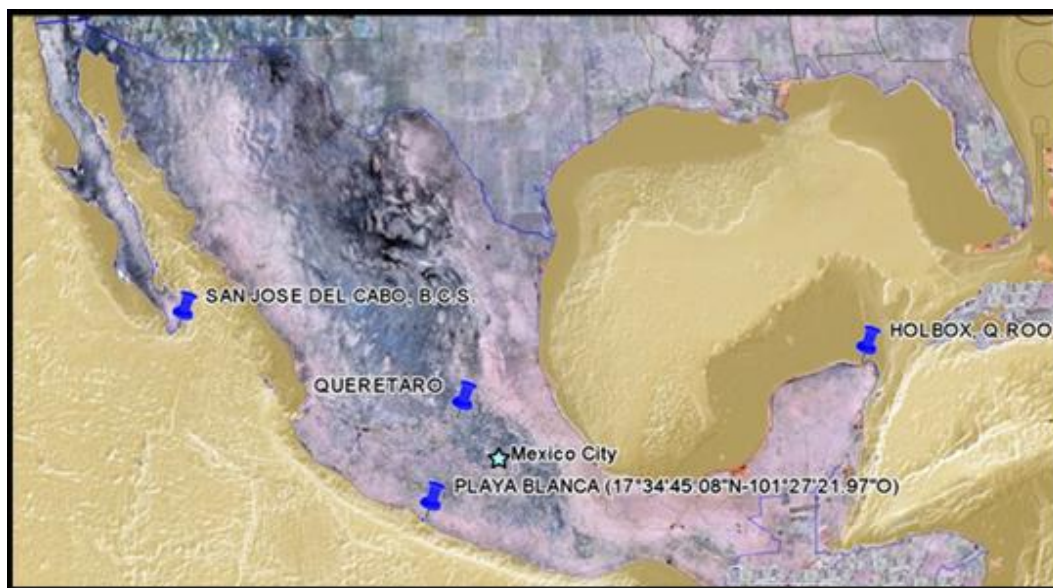
**Figura 3.1** Localización de la zona de estudio y distribución espacial del muestreo de agua de mar (Playa Blanca, Bahía del Potosí).

Posteriormente se hizo un muestreo a 40 km al norte y 40 km al sur, correspondiendo a zonas de mar abierto. Estos lugares se identifican como Troncones (con coordenadas 17°47.000'N-101°43.730'O) y El Calvario (con coordenadas 17°23.080'N-101°09.644'O) como se muestra en la Figura 3.2



**Figura 3.2** Localización de la zona de estudio y distribución espacial del muestreo de agua de mar (Troncones-Playa Blanca-El Calvario).

De igual manera, en base a las zonas donde existen actualmente plantas de desalación en México en los estados peninsulares de Baja California Sur y Quintana Roó y con fines comparativos se hicieron muestreos en dos regiones: Holbox, Q. Roó y San José del Cabo, B.C.S; analizando concentración de cationes y aniones. Estos puntos se indican en la Figura 3.3.



**Figura 3.3.** Mapa donde se indican los puntos muestreados adicionalmente en los que se determinó la calidad del agua de mar.

Para todas las muestras se hicieron determinaciones en campo de pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad. Para ello se empleó un medidor multiparamétrico portátil marca Hanna modelo HI 9828 con cuatro sensores o electrodos para determinación de pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura.

La caracterización química y microbiológica del agua de mar se hizo en base a normas oficiales mexicanas. Cabe destacar, que la determinación de cationes y aniones de agua de mar corresponde al análisis de los principales componentes de agua de mar que son: cloruros, sodio, potasio, magnesio, calcio, y sulfatos; junto con la determinación de sólidos disueltos totales. Las técnicas seguidas de acuerdo a las normas oficiales mexicanas se presentan en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Relación de métodos de análisis usados para la caracterización de agua de mar.

<b>Análisis</b>	<b>Norma oficial mexicana</b>	<b>Método en el que se basa</b>
Calcio	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectofotometría AA
Magnesio	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectofotometría AA
Potasio	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectofotometría AA
Sodio	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectofotometría AA
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001	Titulación
Fluoruro	NMX-AA-077-SCFI-2001	Espectofotometría UV-V
Dureza total	NMX-AA-072-SCFI-2001	Titulación
Alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-2001	Titulación
Carbonatos y bicarbonatos	NMX-AA-036-SCFI-2001	Titulación
Oxígeno Disuelto	NMX-AA-012-SCFI-2001	Titulación
Sílice	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectofotometría AA
Sulfatos	NMX-AA-074-1981	Titulación
Nitratos	NMX-AA-079-SCFI-2001	Espectofotometría UV-V
Nitritos	NMX-AA-099-SCFI-2006	Espectofotometría UV-V
Sólidos disueltos totales	NMX-AA-034-SCFI-2001	Gravimetría
Color	NMX-AA-017-1980	Espectofotometría
Coliformes totales y fecales	NOM-112-SSA-1994	Número más probable
Conductividad eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2000	Potenciometría
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000	Potenciometría
Arsénico	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectofotometría AA
Cadmio	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectofotometría AA
Cobre	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectofotometría AA
Cromo	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectofotometría AA
Hierro	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectofotometría AA
Manganeso	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectofotometría AA
Mercurio	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectofotometría AA
Niquel	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectofotometría AA
Plomo	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectofotometría AA
SAAM	NMX-AA-039-SCFI-2001	Espectofotometría UV-V
Fenoles	NMX-AA-050-SCFI-2001	Espectofotometría UV-V
Nitrógeno amoniacal	NMX-AA-026-SCFI-2001	Titulación
Fósforo total	NMX-AA-029-SCFI-2001	Espectofotometría UV-V
DQO	NMX-AA-030-SCFI-2001	Titulación
Oxígeno disuelto	NMX-AA-012-SCFI-2001	Titulación
Grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000	Gravimetría

La espectrofotometría de absorción atómica para los metales se hizo en un espectrofotómetro marca Perkin Elmer modelo AANalyst 200. La espectrofotometría UV-Visible se hizo en un espectrofotómetro Perkin Elmer modelo Lambda2. Para la gravimetría y preparación de muestras patrón se utilizó balanza analítica marca Sartorius. La conductividad y el pH fueron determinados en un potenciómetro marca Conductronic.

### **Determinación de SDI.**

Se determinó Índice de densidad de lodos, o SDI (silt density index, por sus siglas en inglés), que permite predecir el comportamiento en el proceso de desmineralización con membranas sin pretratamiento

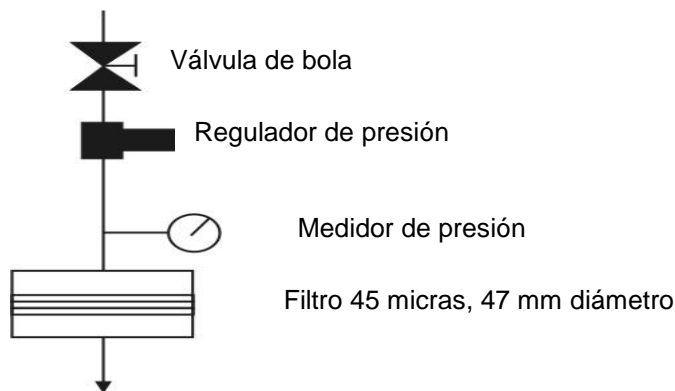
El SDI se determinó de acuerdo a la norma ASTM D4189 - 07 con un equipo de SDI de la empresa Applied Membranes Inc., que consta de una bomba, regulador de presión de salida, manómetro, regulador de alimentación al filtro, y portafiltro. Para esta prueba se utilizan filtros de la marca Millipore de diámetro 47 mm y tamaño de poros de 0.45  $\mu\text{m}$ .

El procedimiento que se siguió fue el siguiente:

La muestra de agua fue filtrada con el filtro Millipore a una presión constante de 30 psi, y se registró el tiempo que tardan 500 ml para fluir a través del filtro. Se continuó la filtración de agua y después de 5, 10 y 15 minutos se volvió a determinar el tiempo en que se fluyeron 500 mL. El SDI se calculó a partir del porcentaje de obstrucción, después del tiempo de operación. El índice se calculó con la fórmula:

$$\text{SDI}_{15} = (1 - t_1/t_2)100/ T$$
 donde  $t_1$  es el tiempo inicial que tardaron los 500 ml en pasar por el filtro y  $t_2$  es el tiempo en que fluyeron los 500 ml después del tiempo T transcurrido (15 minutos) entre cada medición. En caso de que no se pueda determinar el tiempo en que fluyen 500 mL de agua después de 15 minutos de operación porque el filtro está obstruido debido a un exceso de sólidos suspendidos, se puede reportar el  $\text{SDI}_{10}$  o  $\text{SD}_5$ , después de 10 o 5 minutos de operación.

Este índice debería tener valores de % / min, pero se comúnmente se reporta su valor sin unidades. El esquema del equipo se muestra en la Figura 3.4.



**Figura 3.4** Esquema del equipo utilizado para determinación de SDI.

### **Modificación de membranas cerámicas con metales.**

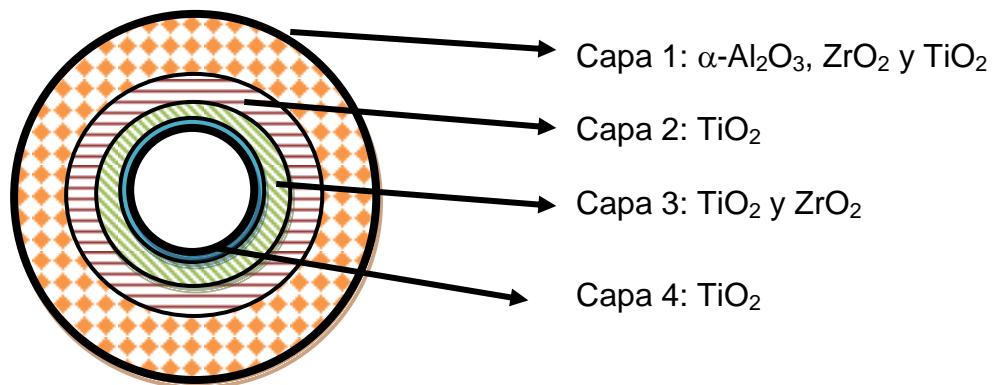
Se trabajó con membranas cerámicas multicapas de nanofiltración (de la compañía TAMI Industries, Nyons, Francia), que se componen de una capa final de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) sobre un sustrato de  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZrO}_2$ . Se trabajaron membranas de 250 mm de largo por 10 mm de diámetro externo. Las membranas utilizadas fueron: membrana de 5 kilodalton (kD) de tamaño de poro (equivalente a corte molecular, MWCO, por las siglas en inglés de molecular weight cut-off) de un canal con un área de superficie de contacto de  $0.0047\text{m}^2$  y membranas de 5kD de siete canales con un área de superficie de contacto de  $0.0132\text{m}^2$ .

Las membranas de un canal empleadas tienen un diámetro interno de 6 mm y un diámetro externo de 10 mm. Los extremos del tubo están recubiertos de PFEP (poli-fluoroetilenpropileno) en una longitud de 1 cm para permitir la conexión de la membrana al reactor.

Las membranas de siete canales tienen siete conductos casi homogéneos de un diámetro hidráulico equivalente a 2 mm. De igual manera sus extremos están recubiertos con PFEP.

Ambos tipos de membrana están formadas por varias capas como se ve en la Figura 3.5.





**Figura 3.5** Corte axial de una membrana TAMI de sustrato mesoporoso de un canal.

Las características para la membrana cerámica de tamaño de poro de 5 kD se muestran en la Tabla 3.2. Para membranas de 1 kD y 15kD, las especificaciones son las mismas, cambiando únicamente la porosidad de la capa exterior

**Tabla 3.2** Características de diferentes capas de la membrana TAMI utilizadas de 5kD de diámetro de poro.

Capa: material	Diámetro de poros internos ( $\mu\text{m}$ )	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
1: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , $\text{ZrO}_2$ y $\text{TiO}_2$	5	$80\mu\text{m}$ - 2 mm
2: $\text{TiO}_2$	0.45	20-30
3: $\text{TiO}_2$ y $\text{ZrO}_2$	0.1	5
4: $\text{TiO}_2$	0.025	1-2

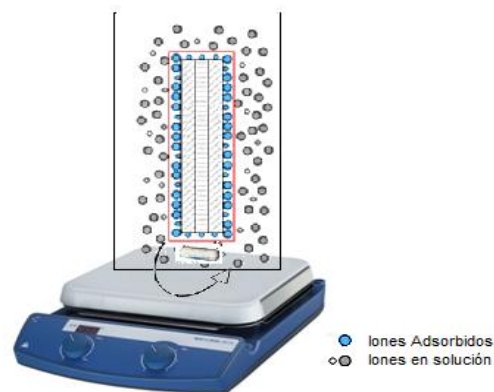
Para cada tipo de membrana se hicieron dos tratamientos metálicos uno con platino y otro con plata utilizando las metodologías siguientes:

I.- Modificación de membrana cerámica con platino.

Se utilizó para la impregnación una solución acuosa de ácido hexacloroplatínico ( $\text{H}_2\text{PtCl}_6$ ) de la compañía Merck, en solución acuosa.

1) Preparación e impregnación de la membrana. La membrana se secó a  $180^\circ\text{C}$  por 3 horas en estufa y se pesó. Posteriormente la membrana se saturó con agua destilada por 2 horas con agitación a temperatura ambiente. Enseguida se

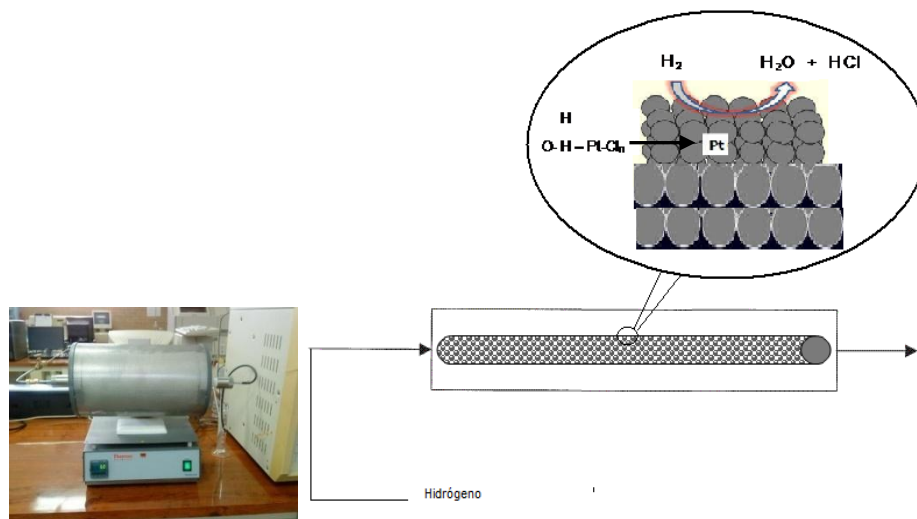
sumergió la membrana en la solución de ácido hexacloroplatínico (0.1g Pt/L) por 4 horas a temperatura ambiente con agitación para que el reactivo migre al interior de los poros de la membrana. La agitación se hace sobre una parrilla con agitación magnética marca IKA con barra magnética como se muestra en la Figura 3.6.



**Figura 3.6** Impregnación de membranas cerámicas con platino.

2) Lavado y secado. La membrana se lavó con solución de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 0.1N por 20 min con agitación magnética para eliminar residuos no depositados. Se repitió el lavado dos veces más con solución fresca de ácido nítrico. Posteriormente se secó la membrana en un horno tubular en una atmósfera de helio por una hora a  $110^\circ\text{C}$ , con una rampa de  $1^\circ\text{C}/\text{min}$ . El horno es marca Barnstead International modelo F21120-33 (de la empresa Thermolyne) y empleando un tubo de cuarzo para contener la membrana y con conexiones para formar la atmósfera inerte.

3) Activación y reducción. Se realizó una reducción en una atmósfera de hidrógeno para descomponer los compuestos de platino formados y dejar únicamente platino metálico depositado en los poros y superficie de la membrana. Esta operación se realizó calcinando la membrana a  $300^\circ\text{C}$  por 3 horas con rampa de  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  en horno tubular marca Barnstead International modelo F21120-33 (de la empresa Thermolyne) y empleando un tubo de cuarzo para contener la membrana y con conexiones para formar la atmósfera reductora de hidrógeno. La membrana fue pesada después de la activación. El proceso de reducción de la membrana se muestra en la Figura 3.7.



**Figura 3.7** Proceso de reducción de membrana impregnada con platino en horno tubular con atmósfera reductora de hidrógeno.

## II.- Modificación de membrana cerámica con plata.

La impregnación se hace formando primero un polímero de plata-etenona sobre la superficie y poros de la membrana, que se produce al hacer reaccionar nitrato de plata con piridina y anhídrido acético. Los reactivos empleados fueron nitrato de plata grado reactivo, piridina A.C.S. y anhídrido acético A.C.S. de la compañía Meyer.

1) Preparación de soluciones e impregnación. La membrana se secó a 180°C por 3 horas en estufa y se pesó. A continuación la membrana se sumergió en una mezcla de dos soluciones: 100 ml de solución de nitrato de plata en piridina al 5% (peso), previamente preparada, enfriada a temperatura ambiente y guardada en frasco ámbar y 250 ml de solución de piridina: anhídrido acético en relación 3:2 (volumen). La membrana se mantuvo en la solución de nitrato de plata con agitación por 12 horas al abrigo de la luz para evitar oxidación fotoquímica de la plata.

2) Secado. Se secó la membrana a temperatura ambiente por 7 horas en campana de extracción y luego en estufa a temperatura ambiente por 20 horas para eliminar los restos de piridina y anhídrido acético.

3) Activación. Para eliminar la parte orgánica del polímero (etenona) es necesario calcinar la membrana y así dejar únicamente la plata en los poros y superficie de la membrana. La calcinación de la membrana se hizo en atmósfera

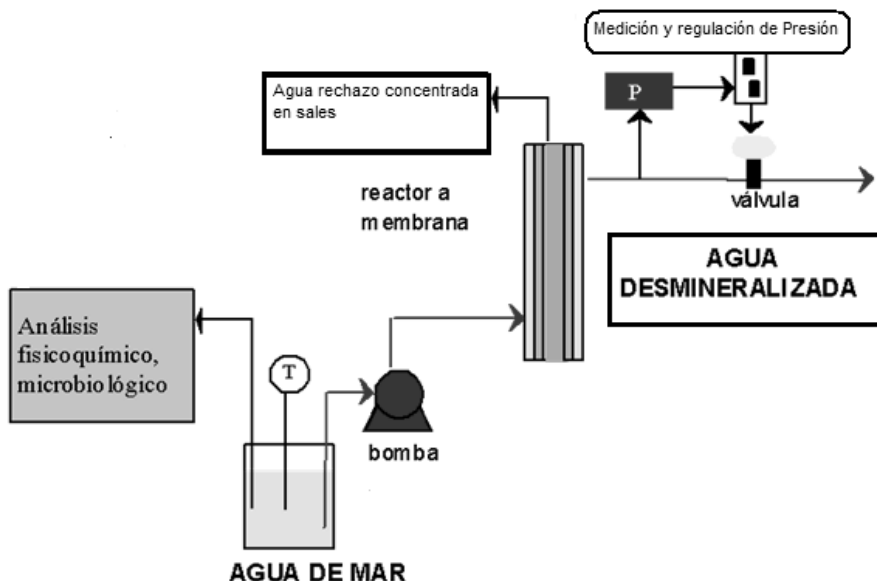
normal a 300°C por 8 horas con rampa de 4°C/min. La calcinación se realizó en un horno marca Barnstead International modelo F21120-33 (de la empresa Thermolyne), utilizando un tubo de cuarzo para contener la membrana. La membrana fue pesada después de la calcinación. El equipo utilizado en la calcinación se muestra en la Figura 3.8.



**Figura 3.8** Equipo utilizado para calcinación de membrana impregnada con plata en horno tubular.

### **Evaluación operativa del desempeño de sistemas de desmineralización con membranas.**

Se montaron membranas cerámicas tratadas y no tratadas en un equipo de filtración de acero inoxidable (cédula 316 L) de la compañía TAMI Industries, provisto con dos manómetros -uno en la alimentación y otro a la salida del rechazo- y con empaques de silicón para colocar la membrana. El permeado se obtuvo a presión atmosférica. Se trabajó el equipo en posición horizontal. Este equipo se puede utilizar para todo el rango de pH, a temperatura máxima de 130°C y presiones entre 0-10 bar. El equipo fue alimentado por una bomba dosificadora Prominent gamma/ L modelo 1602, que trabaja hasta 16 bar. La presión se reguló con una válvula colocada a la salida del agua de rechazo. El diagrama del equipo se muestra en la Figura 3.9.



**Figura 3.9** Diagrama del montaje del reactor a membrana.

De igual modo se hicieron pruebas en un equipo de filtración de ósmosis inversa de marca Prominent para comparar los valores de desempeño. El equipo cuenta con su propia bomba de alimentación. La membrana instalada en el equipo es de poliamida de la compañía Osmonics (General Electric) modelo Desal TFM-50. Se instaló un manómetro en la alimentación para registrar la presión. La regulación de la presión se hizo con una válvula a la salida del rechazo.

La operación de las membranas se hizo con el siguiente proceso:

- 1) Lavado y saturación de la membrana. Para todas las pruebas de las membranas a utilizarse, se pasó agua por dos horas a presión atmosférica y posteriormente se pasó agua destilada por dos horas a presión de 4 bar para asegurar la eliminación de aire y cualquier interferencia.
- 2) Acondicionamiento con agua de mar. Posteriormente se trabajó con agua de mar, dejando un tiempo de 3-4 horas hasta la estabilización del sistema a una presión de 3 o 6 bar, de acuerdo al experimento a realizar. El permeado se obtuvo a presión atmosférica. Todos los experimentos fueron llevados a cabo a temperatura ambiente.

- 3) Operación. Una vez acondicionada la membrana con agua de mar, se procedió en cada caso a realizar la operación, registrándose la presión de trabajo, el tiempo, el volumen de filtrado y rechazo obtenidos; a temperatura ambiente.
- 4) Lavado. Una vez terminado cada experimento, se lavaron las membranas con agua destilada, verificando que la resistencia hidráulica después del lavado fuera la misma que se tenía antes de pasar el agua de mar. Las membranas cerámicas TAMI tienen una resistencia hidráulica entre  $1.00 - 1.25 \text{ m}^{-1}$  para agua destilada entre  $25^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$  de acuerdo a las propias especificaciones de la membrana.

#### I.- Experimentos realizados.

La primera prueba consistió en operar diferentes membranas cerámicas sin tratamiento metálico de 15 kD, 5 kD y 1 kD a las presiones de 3 y 6 bar para evaluar los parámetros de operación de ellas.

La segunda prueba consistió en la operación de las membranas de un canal tratadas con plata y con platino a dos diferentes presiones cada una y compararlas con las membranas sin impregnación a la misma presión.

La tercera prueba consistió en evaluar las membranas cerámicas de siete canales con tratamiento metálico, para las cuales se trabajó únicamente a 6 bar.

La cuarta prueba fue hecha en el equipo de ósmosis inversa con membrana polimérica, el cual se trabajó a una presión de 10 bar.

Finalmente se hicieron comparaciones entre las membranas cerámicas modificadas a 6 bar y con la membrana poliimérica a 10 bar de presión.

El desempeño de cada membrana se evaluó con los siguientes parámetros:

- 1) Flujo de permeado.
- 2) Flux.
- 3) % de rechazo de sales (como SDT) y para las membranas impregnadas con metal y polimérica de OI también se determinó la remoción de algunos aniones y cationes.
- 4) % de recobro de agua producto.
- 5) Consumo de energía por unidad de volumen de filtrado y su costo.

Los valores de flujo, flux, porcentaje de rechazo de sales y porcentaje de recobro de agua producto se determinaron con las siguientes fórmulas:

Flujo:  $Q = V_a/t$

donde  $V_a$  = volumen de alimentación, y  $t$  = tiempo

Recobro:  $\eta = (Q_p/Q_a) \times 100$

donde  $Q_p$  = flujo de permeado, y  $Q_a$  = flujo de alimentación

Rechazo:  $R_i = [1 - (C_p/C_a)] \times 100$

donde  $C_p$  = concentración de permeado, y  $C_a$  = concentración de alimentación de la sustancia  $i$

Flux:  $J = Q_p / A$

donde  $Q_p$  = flujo de permeado, y  $A$  = área de la membrana.

Energía:  $E = P_o / Q_p$

donde  $P_o$  = potencia real consumida del equipo de bombeo.

El porcentaje de rechazo de sales se hizo tomando muestras de producto filtrado o permeado y del rechazo (concentrado) sin recirculación. La presión de operación se consideró como la presión de alimentación.

Para la determinación de la potencia real consumida durante el bombeo en las operaciones de filtración tanto con membranas cerámicas como con las membranas poliméricas de OI, se utilizó un medidor Kill-a- Watt modelo P4400 de la compañía P3 International.

Para la determinación del costo de las membranas, se consideraron los precios comerciales en dólares de las membranas cerámicas y poliméricas, así como de los reactivos utilizados para la impregnación.

Para los valores que variaban en función del tiempo (% de recobro de agua y flux) se calculó el factor de correlación  $r_{xy}$ . El manejo de los datos de los experimentos se hizo calculando la media aritmética,  $\bar{x}$ , de los resultados y con la desviación estándar de los datos,  $s$ , se determinó el intervalo de confianza de la media poblacional,  $\mu$ , al 0.95 de confiabilidad con la fórmula:

$$\mu = \bar{x} \pm z_{0.95/2} s, \quad \text{donde } z_{0.95/2} \text{ tiene el valor } 1.96.$$

## IV.- RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSION

### Caracterización de agua de mar en región Pacífico tropical.

El muestreo se realizó en la bahía El Potosí, Guerrero tomando como punto central Playa Blanca, con coordenadas georeferenciadas 17°34'45.08"N-101°27'21.97"O. Los resultados presentados corresponden al estudio de un año (julio 2009-junio 2010) en una zona delimitada con una distribución espacial de 5 Km, dentro de la misma bahía. También se presentan los resultados de una zona delimitada a una distancia total de 80 Km, del punto mencionado entre Troncones y El Calvario. Estos puntos muestreados corresponden a zonas de mar abierto. Finalmente se presentan los resultados del análisis de algunos aniones y cationes así como microbiológico de dos puntos más, Los Cabos, B.C.S. y Holbox, Q.Roó.

Los resultados de la medición de parámetros de campo determinados *in situ* indican que no hay gran diferencia entre las diferentes épocas del año, excepto la temperatura en verano que fue la más alta. Estos valores se muestran en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Valores de parámetros de campo de agua de mar de la Bahía el Potosí a lo largo de un año, promedio y error estándar de 10 mediciones por temporada.

Parámetro	Verano 2009	Otoño 2009	Invierno 2009-2010	Primavera 2010	Promedio
Temperatura (°C)	27.5 +/- 0.35	20.1 +/- 0.28	19.6 +/- 0.25	21.5 +/- 0.26	22.2 +/- 3.20
Conductividad eléctrica (mS/cm)	46.0 +/- 5.49	57.7 +/- 6.89	58.4 +/- 6.97	57.7 +/- 5.84	54.9 +/- 8.04
pH	8.37 +/- 0.21	7.95 +/- 0.20	8.35 +/- 0.21	7.88 +/- 0.20	8.1 +/- 0.49
Oxígeno disuelto (ppm)	4.35 +/- 2.11	6.36 +/- 3.09	7.15 +/- 3.48	7.93 +/- 3.86	6.4 +/- 5.04

El muestreo comparativo en una extensión de 80 km longitudinales a la costa entre los puntos de Troncones (con coordenadas 17°47.000'N-101°43.730'O) y El Calvario (con coordenadas 17°23.080'N-101°09.644'O) realizado en otoño de 2009 indican que al compararlos con los promedios de Bahía el Potosí no hay variaciones significativas. Los valores de muestras compuestas para cada temporada – formadas por 10 muestras individuales -se presentan en la Tabla 4.2.



**Tabla 4.2** Análisis fisicoquímico y microbiológicos de agua de mar de la Bahía El Potosí a lo largo de un año, análisis de una muestra compuesta para cada temporada.

Parámetro	Verano 2009	Otoño 2009	Invierno 2009/2010	Primavera 2010	Media
Alcalinidad (mg/L)	155.0	132.9	262.8	276.4	206.8
Bicarbonatos (meq/L)	2.193	1.951	1.137	2.144	1.857
Carbonatos (mg/L)	0.954	1.271	0.861	0.953	1.010
Dureza (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	5,456.9	6,343.7	4,534.2	7,165.6	5,875.1
Calcio (mg/L)	367.50	526.71	379.94	248.00	380.54
Cloruros (mg/L)	15,212	16,624	15,789	14,927	15,637
Fluoruros (mg/L)	2.57	1.48	0.63	0.70	1.35
Magnesio (mg/L)	1,473.7	311.5	1,485.9	1,708.3	1,244.9
Potasio (mg/L)	769.6	1,062.2	1,747.9	1,304.4	1,221.0
Sodio (mg/L)	14,881.2	17,079.9	13,670.8	15,052.3	15,171.1
Sulfatos (mg/L)	2,594.0	2,876.9	2,693.8	2,765.8	2,732.6
Sílice (mg/L)	<0.1611	<0.1784	<0.1594	<0.1356	<0.1586
Sólidos disueltos totales (mg/L)	34,744	37,275	35,861	38,183	36,516
DQO (mg/L)	2,476.2	552.2	1,386.6	1,468.9	1,471.0
Fenoles (mg/L)	<0.0109	<0.0107	<0.0107	<0.0273	<0.0149
Detergentes SAAM (mg/L)	0.241	0.063	<0.027	0.120	0.140
Nitratos (mg/L)	<0.0077	<0.0852	<0.0663	<0.0663	<0.0852
Coliformes totales (NMP/100ml)	ND*	ND	ND	ND	ND
Coliformes fecales (NMP/100ml)	ND	ND	ND	ND	ND
Mesofílicos aerobios(UFC/ml)	13	25	5	2	11.25

\*N.D. – No Detectable

Los resultados presentados en la tabla anterior indican que no hay valores significativos de detergentes (SAAM) ni coliformes totales por lo que se asume que no hay perturbación antropogénica en la zona de estudio y podría entrar en la categoría de playas limpias de acuerdo a la norma NMX-AA-120-SCFI-2006, la cual se encuentra en el Apéndice 3, aunque falta hacer la caracterización completa para determinar el cumplimiento de esta norma en la zona de estudio.

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados de parámetros de campo en tres puntos en una zona de muestreo de 80 km para evaluar la variación entre la Bahía el Potosí y dos zonas de mar abierto. Los resultados corresponden a 10 muestras individuales y se presenta la media con su error estándar.

**Tabla 4.3** Valores de parámetros de campo en zona muestreada (80 km de extensión) en otoño 2009 promedio para 10 muestras por área de estudio.

Parámetro	Troncones	Bahía El Potosí	El Calvario	Promedio
Temperatura (°C)	19.6 +/- 0.72	20.1 +/- 0.51	18.5 +/- 0.69	19.4 +/- 1.50
Conductividad Eléctrica (mS/cm)	58.4 +/- 7.12	57.7 +/- 6.89	59.3 +/- 6.87	58.5 +/- 7.11
Potencial Hidrógeno	7.35 +/- 0.27	7.95 +/- 0.20	7.30 +/- 0.23	7.53 +/- 0.64
Oxígeno Disuelto (ppm)	6.45 +/- 3.32	6.36 +/- 3.09	6.92 +/- 4.22	6.58 +/- 3.71

De los resultados de la tabla anterior se puede apreciar que tampoco hubo diferencia significativa para estos parámetros excepto para el pH que en la zona de la bahía El Potosí fue más alto que en los otros dos puntos que son zonas de mar abierto.

Para el análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de laboratorio de las muestras en la zona de estudio (Troncones-Bahía El Potosí- El Calvario) se hizo una muestra compuesta por cada zona, de diferentes puntos recolectados en otoño de 2009. Los resultados muestran gran homogeneidad a pesar de que Troncones y El Calvario son zonas de mar abierto. Estos valores se comparan con la norma oficial NOM-127-SSA1-1994 y se muestran en la Tabla 4.5. La norma oficial completa se encuentra en el Apéndice 2.

**Tabla 4.4** Comparación de análisis fisicoquímico y microbiológico de agua de mar en la zona muestreada (extensión 80 km) para otoño 2009, valores de una muestra compuesta para cada zona de estudio.

Parámetro	Troncones	Playa Blanca	El Calvario	Media	Límite permisible
Alcalinidad (mg/L)	135.2	132.9	134.8	134.3	N.N.**
Bicarbonatos (meq/L)	3.2	2.0	3.0	2.7	N.N.
Color (Pt-Co)	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	20
Calcio (mg/L)	610.2	540.5	649.5	600.1	N.N.
Cloruros (mg/L)	20,332	20,474	20,598	20,468	250.00
Dureza (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	6,300.2	6343.7	6447.0	6363.6	500.00
Fluoruros (mg/L)	1.36	1.59	1.23	1.39	1.50
Grasas y Aceites (mg/L)	13.54	17.56	21.66	17.59	N.N.
Hierro (mg/L)	0.31	0.43	0.30	0.35	0.30
Magnesio (mg/L)	1,477.5	331.2	1,314.5	1,141.1	N.N.
Potasio (mg/L)	842.6	1068.9	845.8	919.1	N.N.
Sílice (mg/L)	<0.1784	<0.1784	<0.1784	<0.1784	N.N.
Sodio (mg/L)	12,955.1	12,941.8	12,132.3	12,676.4	200.00
Sólidos disueltos totales (mg/L)	39,210	38,158	38,843	38,737	1,000.00
Sulfatos (mg/L)	2,689.2	2,800.1	3,299.8	2,929.7	400.00
SAAM (mg/L)	0.1338	0.0628	0.1225	0.1064	0.50
Coliformes totales (NMP/100ml)	N.D.*	N.D.	N.D.	N.D.	2
Coliformes fecales (NMP/100ml)	N.D	N.D	N.D	N.D	Ausencia

\*N.D. – No detectable \*\*N.N. No normado

Los valores de la tabla anterior muestran que no existe gran diferencia entre el agua de mar de la bahía El Potosí comparada con los otros dos puntos de mar abierto.

El análisis de varios metales pesados se muestra en la Tabla 4.6 donde se comparó con la norma oficial NOM-127-SSA-1994. Los valores presentados corresponden a muestras compuestas formadas por 10 muestras individuales.

**Tabla 4.5.** Comparación de los valores de metales pesados de agua de mar en la zona muestreada (extensión 80 km) para otoño 2009.

Parámetro	Valor Troncones (mg/L)	Valor Bahía El Potosí (mg/L)	Valor El Calvario (mg/L)	Límite Permisible (mg/L)
Aluminio	< 0.48	< 0.25	< 0.48	0.20
Arsénico	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.05
Cadmio	0.09	0.09	0.09	0.005
Cobre	< 0.03	< 0.04	< 0.03	2.00
Cromo total	0.07	< 0.10	< 0.07	0.05
Hierro	0.31	0.43	0.3	0.30
Manganeso	0.06	0.06	0.06	0.15
Mercurio	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.001
Plomo	0.47	0.47	0.44	0.025

Existen valores de metales que están fuera de la norma para agua potable, que pueden ser de origen natural de acuerdo al tipo de suelo de la zona (Ramírez-Herrera et al, 2007) y que se debe tener en cuenta para el aprovechamiento de agua de mar de la zona.

Los resultados de la comparación del análisis realizado a agua de mar de los otros puntos, Los Cabos, B.C.S. y Holbox, Q.Roó indican valores semejantes en las características del agua de mar, incluso una menor salinidad en El Potosí, Gro. como se muestra en la Tabla 4.3. En este caso también se trata de análisis de una muestra compuesta por cada zona de estudio formada por 10 muestras individuales

**Tabla 4.6** Comparación de análisis de agua de mar entre la zona de estudio del proyecto y los puntos muestreados en las penínsulas de Baja California y Yucatán.

Parámetro (mg/L)	Bahía El Potosí, Gro.	Los Cabos, B.C.S.	Holbox, Q. Roó
Bicarbonatos	2.0	2.5	2.7
Calcio	540.5	325.1	364.1
Cloruros	20,473.9	21,717.0	22,846.2
Magnesio	331.2	1150.0	1195.0
Potasio	1068.9	317.3	380.6
Sodio	12,941.8	13,237.6	13,788.2
Sulfatos	2,800.1	3,024.2	3,294.1
Sólidos disueltos totales	38,158.4	39,781.4	41,880.7
Coliformes totales (NMP/100 ml)	N.D.	N.D.	N.D.
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	N.D.	N.D.	N.D.

N.D. – No detectable

#### Determinación de SDI.

El análisis del índice de densidad de lodos coloidales, SDI<sub>15</sub>, (a los 15 minutos de filtración) se muestra en la Tabla 4.7, donde se indican los valores tanto temporales como espaciales. Para la muestra de verano de 2009 no se pudo determinar este índice por no contar con el equipo para su determinación.

**Tabla 4.7.** Comparación temporal y espacial de los valores de SDI<sub>15</sub>.

Bahía El Potosí Otoño 2009	Bahía El Potosí Invierno 2009	Bahía El Potosí Primavera 2010	Bahía El Potosí Promedio	Troncones	El Calvario
5.9	5.7	4.5	5.4	5.3	5.5

Estos valores indican que el agua de mar de la bahía El Potosí puede entrar a un proceso de membranas, para su desmineralización o desalinización sin necesidad de un pretratamiento fisicoquímico o la utilización de una membrana de ultrafiltración de acuerdo a diferentes autores (Greenlee et al, 2009; Yiantsios et al, 2005; Brehant et al, 2002)

### **Modificación de membranas cerámicas con metales.**

A las membranas inorgánicas cerámicas se les realizó una modificación, consistiendo en impregnación aniónica de metales (platino y plata).

En el caso de platino, las membranas cerámicas fueron impregnadas con una solución de ácido hexacloroplatínico, posteriormente fueron lavadas con solución de ácido nítrico, secadas en estufa en atmósfera inerte (gas helio). Finalmente fueron calcinadas a 300°C en una atmósfera reductora de hidrógeno para dejar el platino en estado metálico. El incremento promedio de peso después del tratamiento con platino fue de 0.011% para membranas de canal y 0.012% para membranas de 7 canales.

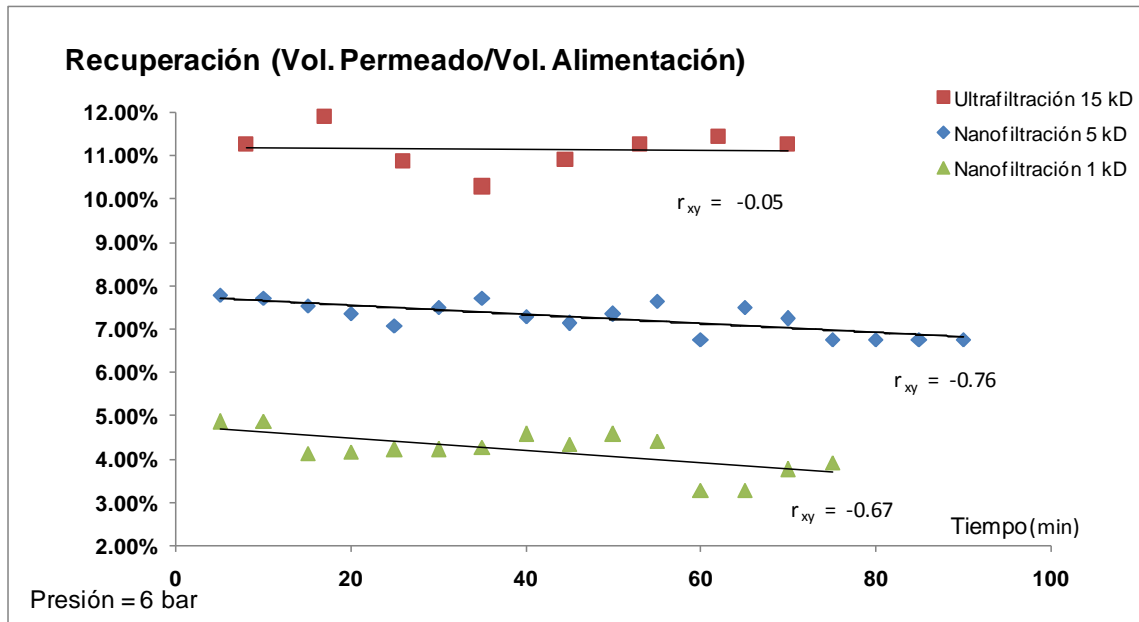
En el caso de la plata, las membranas fueron impregnadas en una solución de nitrato de plata base piridina para formar un polímero de plata que se depositó en la membrana. Posteriormente la membrana fue secada y sometida a calcinación a 300°C para dejar únicamente la plata fijada a la membrana. Después del tratamiento, el incremento promedio de peso para las membranas impregnadas con plata fue de 0.014% para membranas de un canal y de 0.009% para membranas de 7 canales.

**Tabla 4.8** Incremento en peso de las membranas cerámicas después del proceso de impregnación con platino y plata.

Metal impregnado en la membrana cerámica	Número de canales	Incremento en peso
Platino	1	0.011%
Platino	7	0.014%
Plata	1	0.012%
Plata	7	0.009%

### **Determinación de condiciones de operación del reactor a membrana, con diferentes tipos de membranas sin modificar.**

El comportamiento de la recuperación de agua permeada, dependiendo del tipo de poro de membrana cerámica: ultrafiltración (diámetro de poro de 15 kD) hasta nanofiltración (diámetros de poro de 5 kD y 1 kD) se muestra en la Figura 4.1.

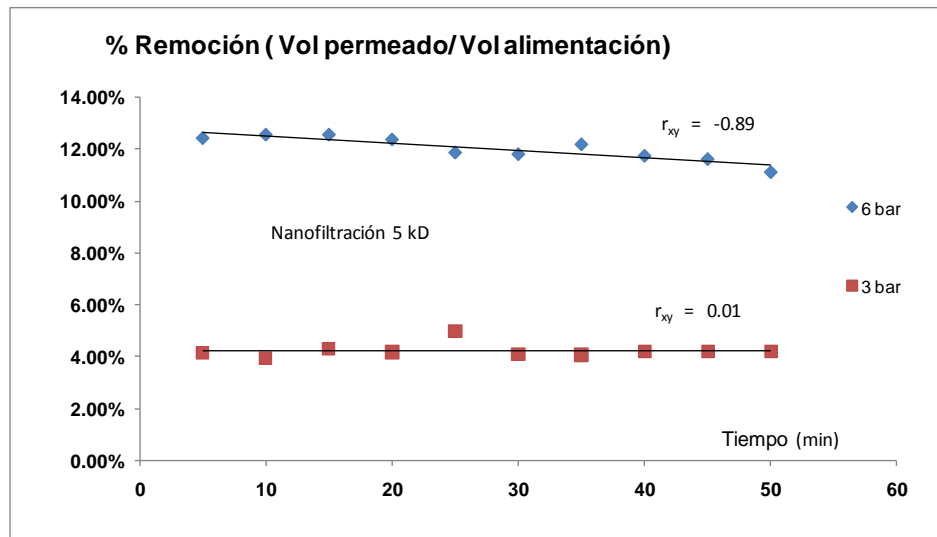


**Figura 4.1** Valores de recuperación de permeado con membranas cerámicas de un canal de diferente tamaño de poro sin tratamiento metálico, a presión de 6 bar.

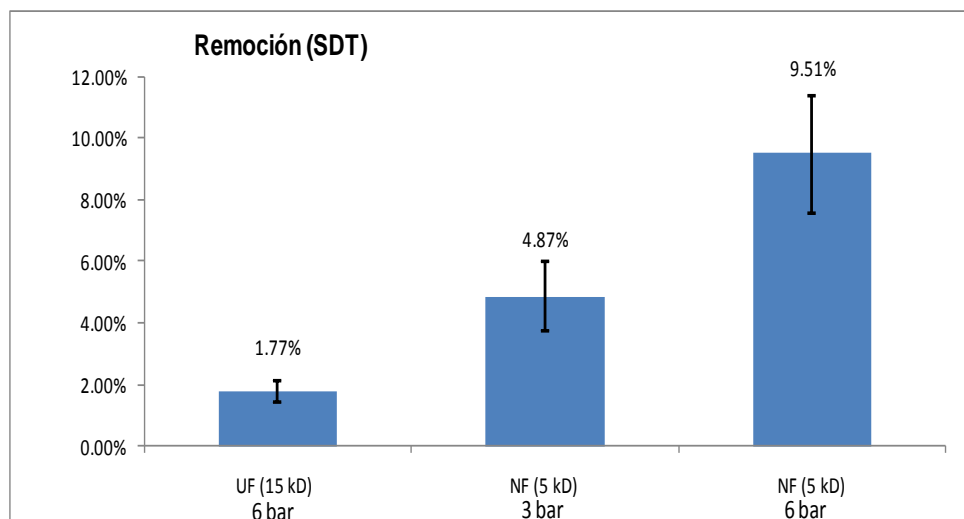
En la Figura 4.1 se nota que en el caso de filtración con membranas de poros de mayor diámetro, como lo es el caso de la ultrafiltración, existe correlación casi nula entre la tasa de recuperación y el tiempo de operación y se acerca a una línea horizontal. Este resultado es esperado cuando se usa agua de alimentación con bajo contenido de sólidos suspendidos o coloidales, pues como no existe una verdadera remoción de iones, la baja de porcentaje de volumen permeado es únicamente por la resistencia mecánica de la membrana. Esto es congruente con resultados de otros estudios (Wilf y Bartels, 2005; Velizarov et al, 2004; y Drioli et al, 2002) en los que, cuando existe un efecto en la operación de una membranas de ultrafiltración o de mayor tamaño de poro con el tiempo, se recomienda la ultrafiltración como un pretratamiento. Esto coincide con agua con un valor de SDI mucho mayor a 5, que dará problemas en procesos de membrana de poro más fino. Por los resultados obtenidos, se decidió seguir el diseño experimental con membranas de 5kD de tamaño de poro. Se descartaron las membranas de 1 kD de tamaño de poro por su baja tasa de recuperación.

Para membranas de 5 kD, se siguieron realizando experimentos hasta la optimización de la tasa de recuperación de volumen permeado trabajando a

diferentes presiones y con la regulación de flujos con las válvulas. De valores entre 7-8% se logró aumentar a valores entre 11 y 13% de recuperación a 6 bar. El comportamiento optimizado de la recuperación de agua permeada en función de la presión es mostrado en la Figura 4.2. Los resultados de la remoción de sales, expresada como SDT para estas membranas se ve en la Figura 4.3 y corresponde a la media de 6 experimentos por cada membrana probada.



**Figura 4.2** Valores de recuperación de permeado con membranas cerámicas de 5 kD de un canal sin tratamiento metálico a diferentes presiones de operación en condiciones optimizadas.

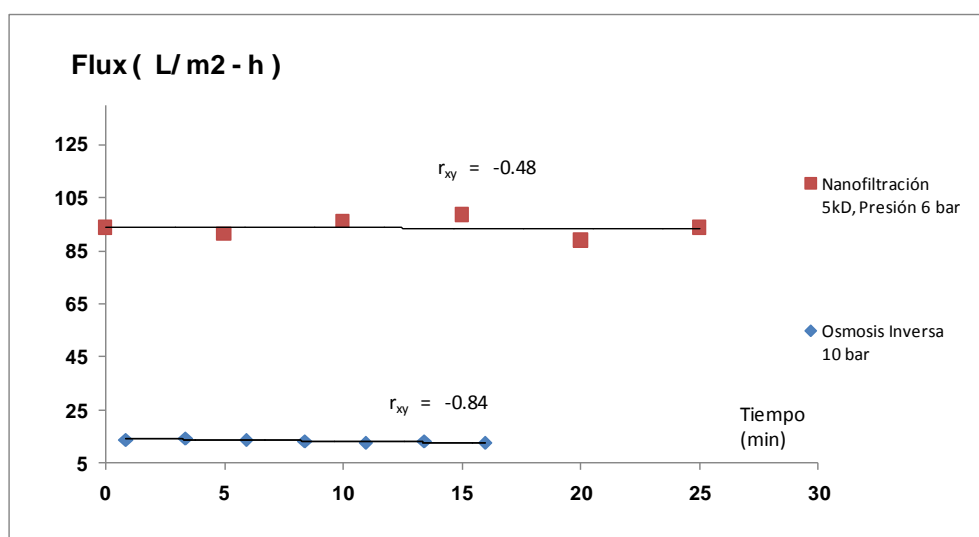


**Figura 4.3** Valores de remoción de sales, expresado como SDT para membranas cerámicas de 5 kD de un canal sin tratamiento metálico a diferentes presiones de operación en condiciones optimizadas, promedio de 6 muestras.



Los valores de las Figuras 4.2 y 4.3 indican que a 6 bar es donde se obtiene tanto un buen valor de recuperación de permeado como una mejor remoción de sólidos disueltos, por lo que se selecciona la presión de 6 bar como la presión óptima de operación, aunque para membranas tratadas con metal se trabajó de nuevo con ambas presiones. Los valores obtenidos son semejantes a otros estudios usando diferentes membranas y soluciones de alimentación. Mazzoni et al (2009) obtuvieron rechazo de sal entre 5 y 12% usando membranas cerámicas de tres canales a presión de 6 bar con solución de baja concentración de varios iones; Deon et al (2007) obtuvieron remociones cercanas al 20% usando soluciones muy diluidas de NaCl con membranas cerámicas a presión de 5 bar; y Hilal et al (2005) obtuvieron rechazo de sal menor a 10% usando membranas poliméricas de nanofiltración y solución de NaCl (25000 ppm) a presión de 6 bar y subió a valores cercanos a 12 % con presiones de 10 bar, que no se puede lograr con las membranas cerámicas.

El comportamiento del flux del agua permeada de la membrana de 5 kD y un canal sin tratamiento respecto al tiempo, se muestra en la Figura 4.4. En esta figura se compara con el comportamiento de una membrana de ósmosis inversa (polimérica). Los valores de flux son comparables a los encontrados por los investigadores mencionados en el párrafo anterior.

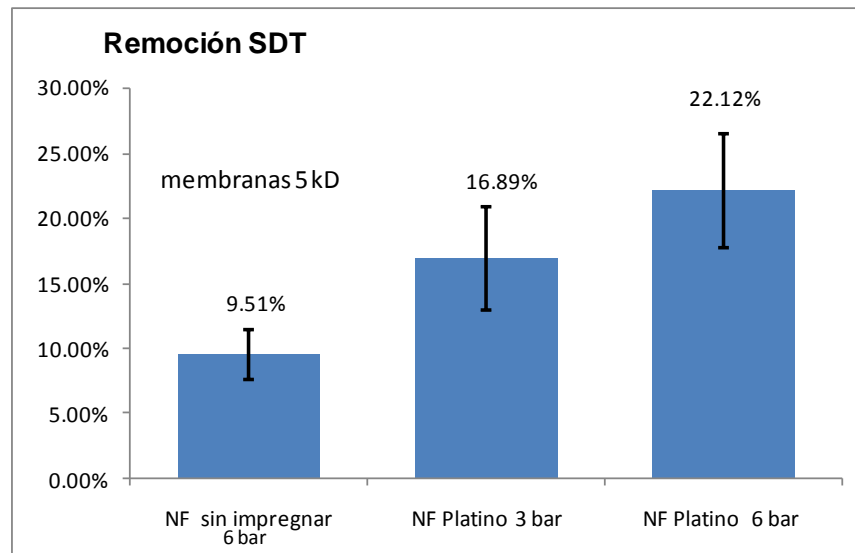


**Figura 4.4** Valores de flux con membranas de nanofiltración de un canal sin tratamiento metálico y de ósmosis inversa a su presión óptima de operación.

## Evaluación operativa y del desempeño de sistemas de desmineralización con membranas modificadas.

Las membranas inorgánicas cerámicas impregnadas (con el metal platino y plata) se montaron en el reactor y de esta manera se evaluó la remoción de sales de agua salada, reportada como sólidos disueltos totales (SDT). Adicionalmente se realizaron comparaciones con la membrana polimérica convencional de ósmosis inversa.

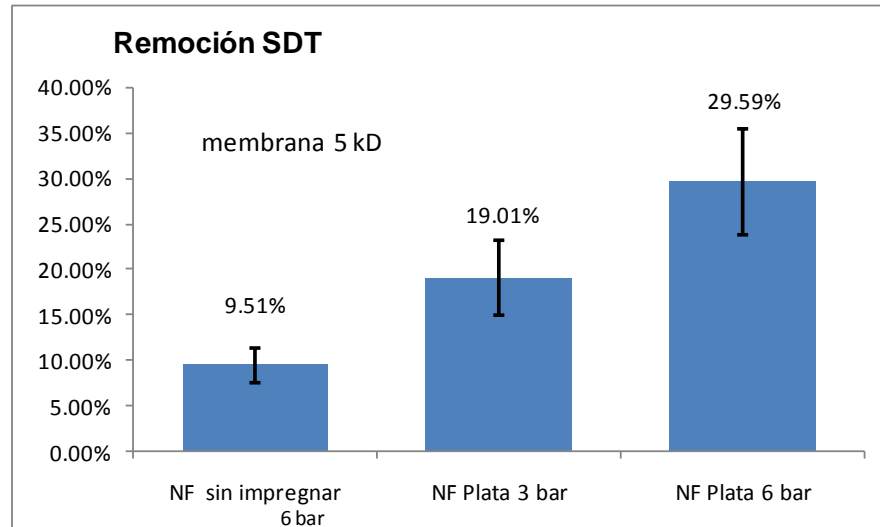
Primero se hizo la determinación en membranas de 1 canal. En el caso del platino se hizo una comparación a diferentes presiones como se muestra en la Figura 4.5, donde se compara con la membrana sin impregnar. Los resultados corresponden a la media de 6 datos por cada tipo de membrana.



**Figura 4.5** Remoción de sales de agua de mar, expresado como SDT, para membranas cerámicas modificadas de 5 kD de un canal, impregnadas con platino.

Los datos en la Figura 4.5 indican que hubo un incremento en la remoción de sales con la impregnación de platino, incluso utilizando una presión de operación menor y que dicha diferencia es significativa, con lo que se comprueba la hipótesis para el caso de impregnación con platino. El valor estadístico al 0.95 de confiabilidad de de la remoción sin impregnación a 6 bar es de 7.60-11.42% mientras que la remoción con impregnación de platino a la misma presión es de 17.77-26.47%.

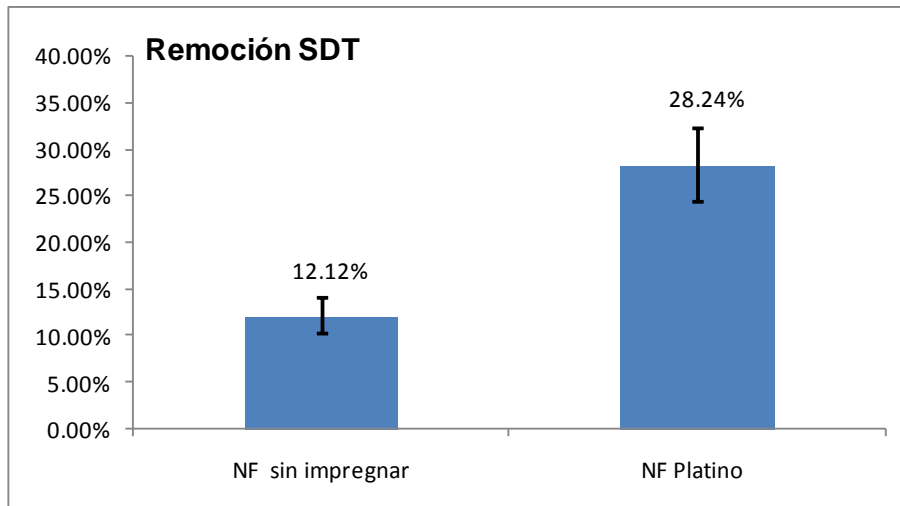
En el caso de la impregnación con plata, la remoción de sales (expresada como SDT) se muestra en la Figura 4.6. Los resultados corresponden a la media de 6 datos por cada tipo de membrana



**Figura 4.6** Remoción de sales de agua de mar, como SDT, para membranas cerámicas modificadas de 5 kD de un canal impregnadas con plata.

En el caso de la impregnación con plata también se logró una diferencia significativa respecto a la remoción de SDT respecto a la membrana sin impregnar aún a una presión menor, con lo que también se comprueba la hipótesis para las membranas impregnadas con plata. El valor al 0.95 de confiabilidad de remoción con impregnación de plata a 6 bar es de 23.85-35.33%.

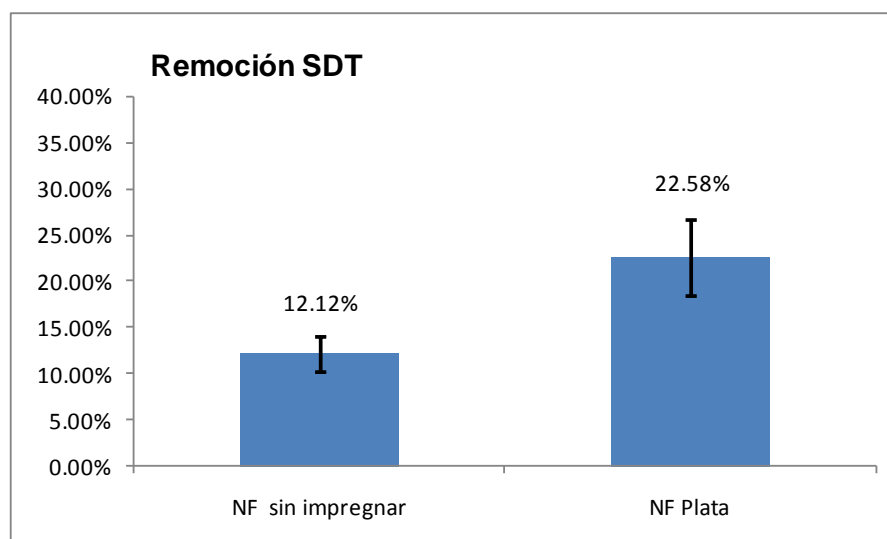
Posteriormente se realizaron pruebas con membranas de 7 canales impregnadas con metal para aumentar el porcentaje de remoción de sales al aumentar el área de contacto. Los resultados de las membranas impregnadas con platino se muestran en la Figura 4.7. Los datos corresponden a la media de 4 muestras por membrana.



**Figura 4.7** Remoción de sales de agua de mar, como SDT, para membranas cerámicas modificadas de 5 kD de siete canales, impregnadas con platino a 6 bar de presión.

La remoción de SDT con membranas de siete canales impregnadas con platino es significativamente mayor que la membrana de siete canales sin impregnar. Además se logró una remoción de SDT mayor a la de un canal. Para la membrana de siete canales sin impregnar el valor de la remoción al 0.95 de confiabilidad es de 9.91-14.33% y una vez impregnada se tuvo un valor de 20.97-35.51%.

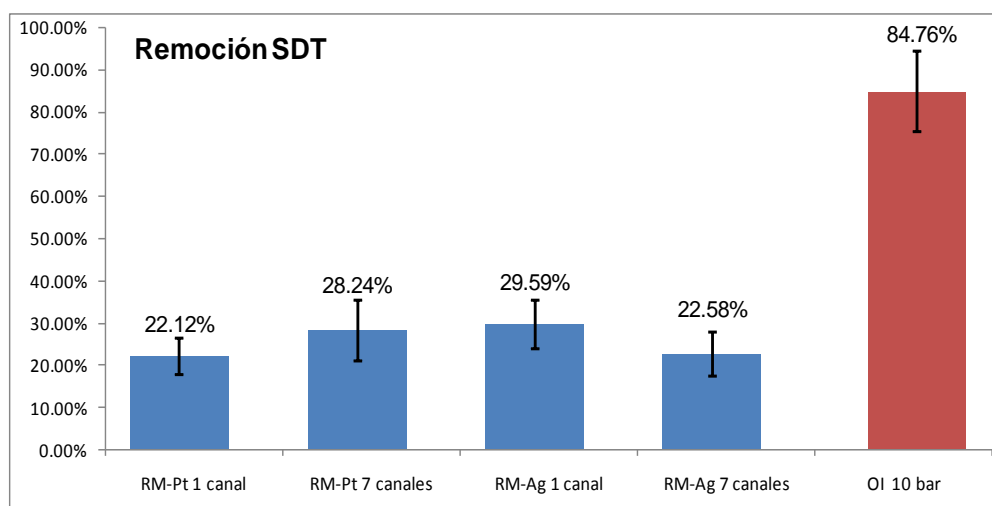
La remoción de SDT con membranas de siete canales impregnadas con plata se muestra en la Figura 4.8. Los datos corresponden a la media de 4 determinaciones por membrana.



**Figura 4.8** Remoción de sales de agua de mar, como SDT, para membranas cerámicas modificadas de 5 kD de siete canales, impregnadas con plata a presión de 6 bar.

En este caso también hubo una diferencia significativa entre la membrana impregnada con plata que con la membrana sin impregnar de siete canales, sin embargo en este caso se notó un valor menor para la membrana impregnada con plata de siete canales que con la de un canal. El valor al 0.95 de confiabilidad para membrana impregnada con plata de siete canales es de 17.34-27.82%.

Los valores de remoción de SDT para el sistema de reactor con membranas cerámicas impregnadas con plata o platino (RM-metal) se resumen y se comparan con osmosis inversa (OI) en la Figura 4.9. La remoción máxima de sales, expresada como SDT, para las membranas cerámicas tratadas es cercana a 30%, y en el caso de planta de ósmosis inversa se presentan remociones cercanas al 85%. Para el caso de OI los datos corresponden a la media de 6 determinaciones.

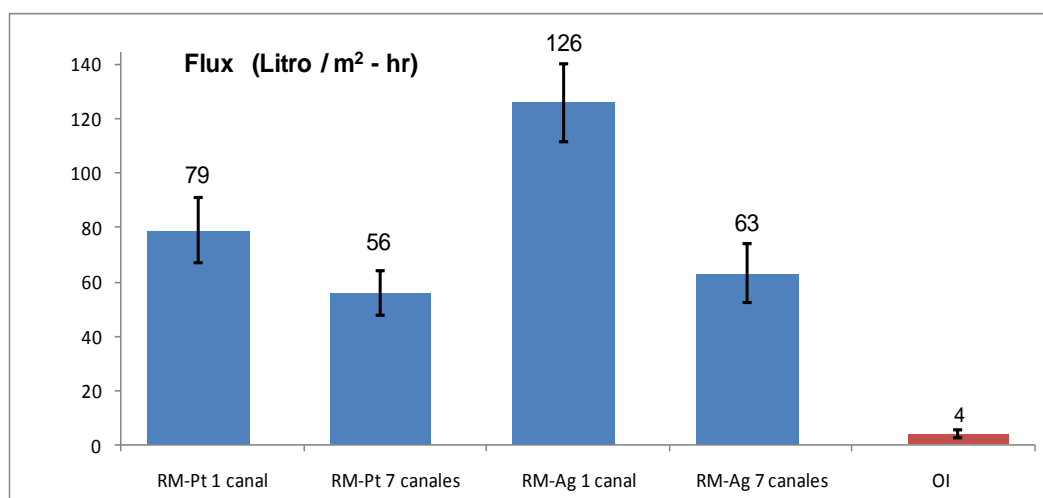


**Figura 4.9** Comparación de los valores óptimos de remoción de SDT de agua de mar entre membranas cerámicas modificadas de 5 kD (RM-metal) y presión de 6 bar y el sistema de osmosis inversa (OI) con membrana polimérica a 10 bar de presión.

Aunque no hay diferencias significativas, se asume que la remoción de sales es mayor con platino impregnado en membranas de 7 canales (con mayor área superficial), porque el mecanismo de impregnación de este metal facilita la impregnación metálica en toda la superficie de la membrana. Sin embargo en el caso de impregnación con plata, la remoción de sales es mayor en membranas de 1 canal (con menor área superficial), ya que durante el mecanismo de impregnación de este metal se forma un complejo de mayor tamaño molecular lo que dificulta la

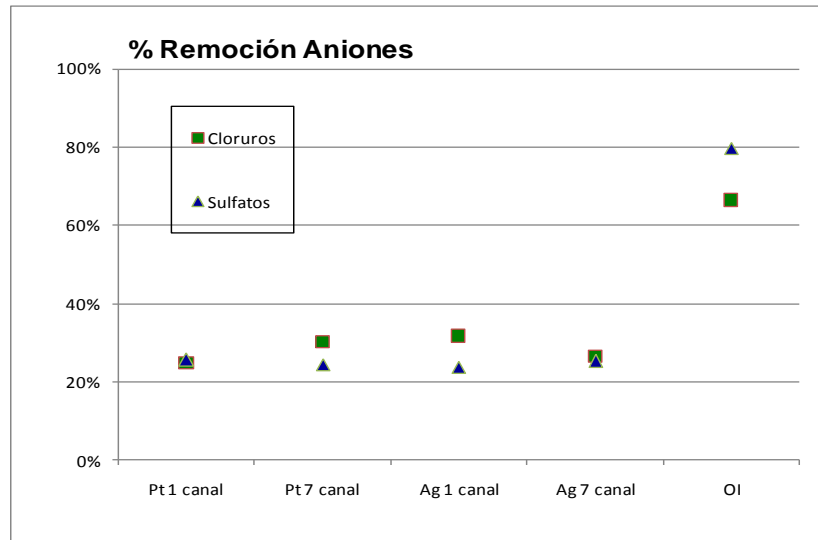
impregnación metálicas en espacios intersticiales menores. Este comportamiento también se nota en el incremento de peso después de la impregnación, que para plata con un canal es mayor que para plata de siete canales.

El flux óptimo para cada una de las membranas tanto del proceso propuesto de reactor a membrana (RM-metal impregnado) como el de Osmosis Inversa (OI) se muestra en la Figura 4.10, considerando flux como la cantidad de agua permeada por unidad de área por unidad de tiempo. Los valores presentados corresponden a la media de la misma cantidad de experimentos indicados para cada tipo de membrana en los párrafos anteriores.



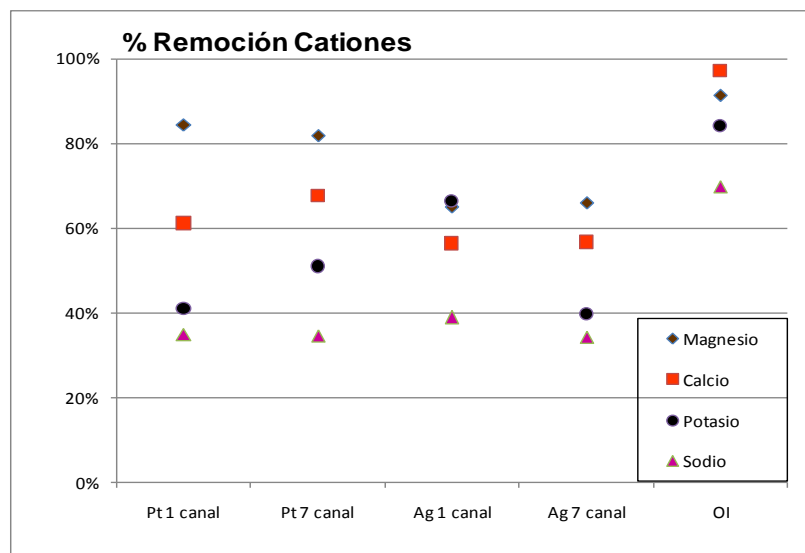
**Figura 4.10** Comparación del flux óptimo en diferentes tipos de membrana cerámicas modificadas de 5 kD (RM-metal) a 6 bar presión y OI a 10 bar de presión.

Además de la comparación de remoción de SDT, se realizó un análisis de remoción de cationes y aniones empleando ambos tipos de membrana: reactor a membrana (RM-metal) y osmosis inversa (OI). La comparación de remoción de los dos principales aniones, que son cloruros y sulfatos se muestra en Figura 4.11. Los otros aniones como carbonatos, fluoruros y bicarbonatos por su baja concentración no se reportan.



**Figura 4.11** Comparación de remoción de los dos principales aniones del agua de mar con membranas cerámicas modificadas de 5 kD (a 6 bar presión) y membrana de OI (a 10 bar de presión).

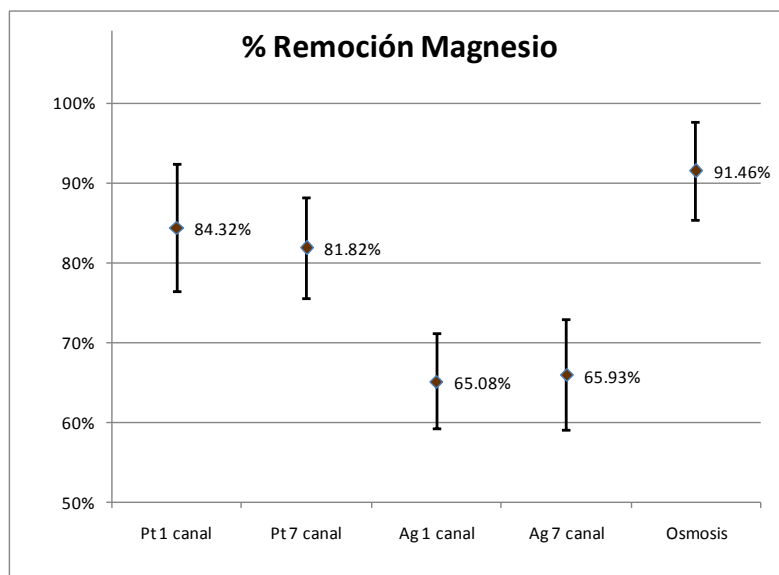
De manera equivalente la comparación de remoción de los principales cationes se muestra en Figura 4.12. Los cationes seleccionados son, de manera similar al caso de los aniones, los más abundantes: sodio, magnesio, calcio y sulfatos.



**Figura 4.12** Comparación de remoción de los principales cationes de agua de mar con membranas cerámicas modificadas de 5 kD (6 bar de presión) y membrana de OI (10 bar presión).

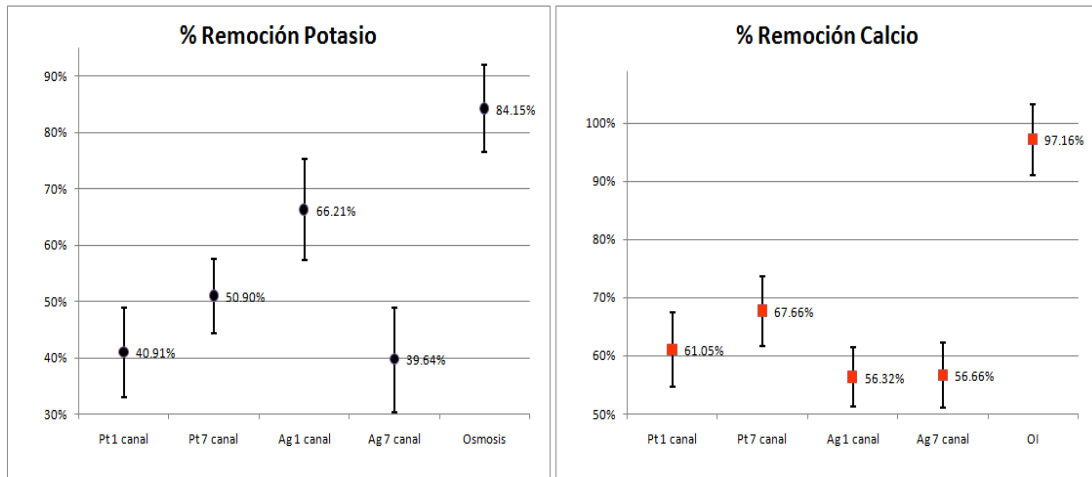
Se presenta una mayor remoción de cationes que de aniones, lo que indica que los metales impregnados en la membrana tienen un efecto de rechazo mayor con los iones metálicos disueltos en el agua, aumentando su rechazo. Estos resultados son congruentes con la teoría para el caso de calcio y magnesio, pues los iones divalentes al hidratarse tienen radios mayores que los iones monovalentes, pero no en el caso de sulfatos que se esperaba fueran rechazados en mayor proporción que los cloruros. Además las cargas de los metales impregnados en las membranas tienden a ser de carácter positivo y tener mayor rechazo para cationes que aniones. Este comportamiento ha sido reportado por Mazzoni et al (2009) y Cheverau et al (2010) pero empleando membranas cerámicas sin impregnar y con soluciones de baja concentración de compuestos iónicos individuales, en los que obtuvieron una remoción mayor para calcio o magnesio que para sodio.

En las Figura 4.13 y 4.14 se muestra la remoción individual de magnesio, calcio y potasio. Estos iones son los que tienen mayores diferencias por el tipo de metal impregnado en la membrana. Los datos presentados corresponden a la media de 6 repeticiones para las membranas cerámicas de 1 canal y para OI y 4 repeticiones para las membranas cerámicas de 7 canales.



**Figura 4.13** Comparación de remoción de magnesio de agua de mar con membranas cerámicas modificadas de 5 kD (6 bar de presión) y membrana de OI (10 bar presión).



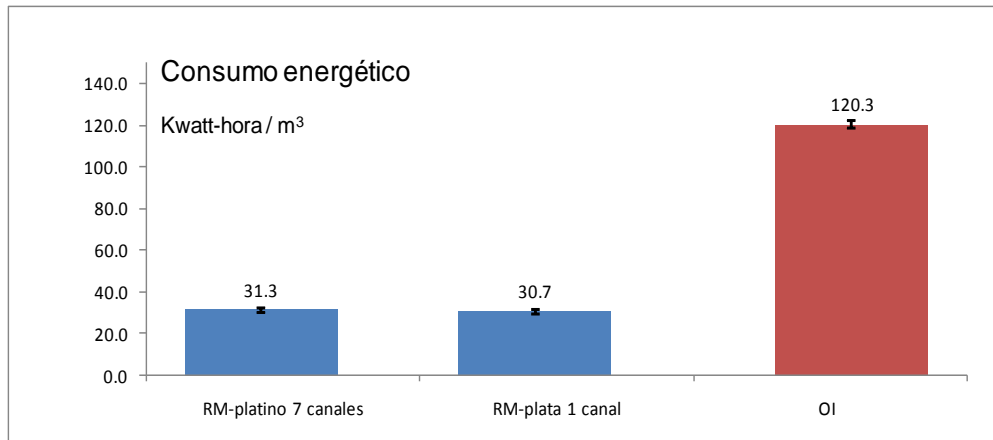


**Figura 4.14** Comparación de remoción de potasio y calcio de agua de mar con membranas cerámicas modificadas de 5 kD (6 bar de presión) y membrana de osmosis inversa (10 bar presión).

En las membranas impregnadas con platino, la remoción de magnesio tiene valor superior a las de plata e incluso está en el mismo rango que la remoción lograda en la membrana polimérica de ósmosis inversa.

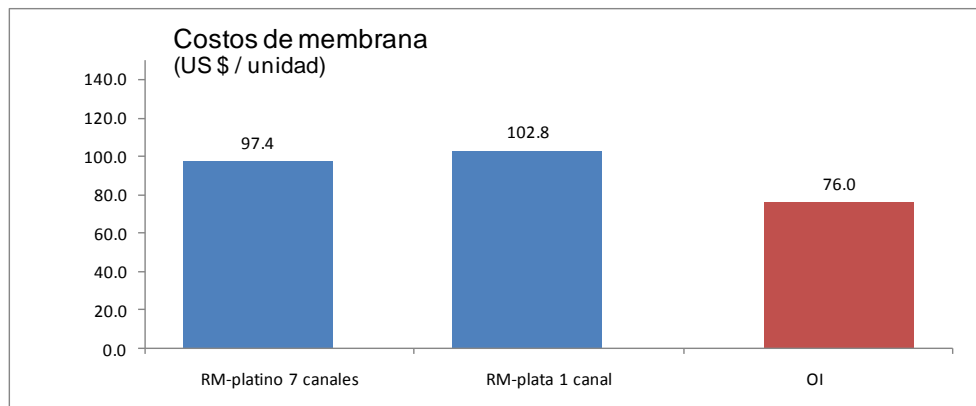
Para el calcio y el potasio se tienen valores diferentes entre las membranas impregnadas con platino y con plata. Para el potasio se tiene una mayor remoción en el caso de membrana de plata de un canal respecto a las de platino, pero también respecto a la membrana de plata de siete canales. En el caso del calcio, para la membrana impregnada con platino de siete canales se logra una remoción apenas mayor que para las membranas impregnadas con plata; aunque la membrana de un canal impregnada con platino no tiene una diferencia significativa con las membranas de plata. Para el sodio y aniones no hubo diferencia significativa por el tipo de metal empleado.

Se realizó una medición de consumo energético por unidad de volumen de agua de entrada al proceso ( $\text{kw/m}^3$ ) comparando las membranas cerámicas (RM) con la planta piloto de osmosis inversa (OI). Esto se muestra en la Figura 4.15.



**Figura 4.15** Comparación de consumo energético en los sistemas de membranas cerámicas modificadas de 5 kD (RM-metal) y de OI.

También se evaluaron los costos de membrana cerámica impregnada con metal y membrana de osmosis inversa, la comparación de dichos costos se muestra en la Figura 4.16.



**Figura 4.16** Comparación de costo unitario de membrana en los sistemas de membranas cerámicas modificadas de 5 kD (RM-metal) y de OI.

Respecto a la evaluación económica, las membranas cerámicas consumen sólo el 25% de energía de las membranas de ósmosis inversa, aunque por las diferencias en las condiciones (presión de operación, resistencia de la membrana y remoción de sales), esta comparación sólo es una referencia. Como las pruebas fueron hechas en equipos de laboratorio, el consumo energético tanto en membranas cerámicas como de osmosis inversa están por arriba de los valores industriales normales de operación de equipos de filtración con membranas y aún

más si se comparan con valores de plantas que utilizan dispositivos de ahorro de energía. Se recomienda hacer un escalamiento de los equipos de laboratorio a equipos a nivel industrial para tener un valor representativo en la comparación de consumo energético.

Con respecto al costo de las membranas cerámicas impregnadas con metal, éstas resultan casi un 32% por arriba de las membranas poliméricas comerciales de nanofiltración u OI. No se pudo determinar el costo por unidad de volumen de agua pues todas las membranas utilizadas siguen en operación y no fue posible determinar el volumen que se puede tratar con cada membrana o el tiempo de recuperación real de la inversión, pero se estima que las membranas cerámicas duren el doble de tiempo que las poliméricas por estudios previos, de plantas industriales en operación. Con esta estimación las membranas cerámicas serían en realidad un 35% más económicas que las poliméricas.

## V.- CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

1) Con los resultados obtenidos se comprobó la hipótesis, al concluir que se obtienen valores más altos de remoción de sólidos disueltos al utilizar membranas cerámicas impregnadas con metal que al usar membranas cerámicas sin impregnar, tanto a 3 bar como a 6 bar de presión y con ambos metales utilizados y con membranas de un canal como de siete canales.

2) De los resultados de remoción de Sólidos Disueltos Totales (SDT) se pudo concluir que las membranas cerámicas impregnadas con platino o plata se pueden utilizar como un proceso único para remoción de sales en aguas salinas o salobres de baja concentración. O también en el caso de agua de mar, se puede considerar como una desmineralización previa dentro de un proceso integral de desalinización total utilizando para ello un posterior proceso de membranas como OI.

3) Por los datos obtenidos de remoción de cationes, se concluye que las membranas cerámicas con platino tienen una remoción de magnesio muy cercana a la obtenida con la ósmosis inversa, por lo que se puede considerar su uso para tratamiento de aguas con alto contenido de estos iones. Y en el caso de su utilización como un proceso de desmineralización único también se logra una buena remoción de calcio, aunque menor a la obtenida por OI.

4) De los resultados obtenidos de la caracterización del agua de mar de la Bahía El Potosí, Gro., se concluye que es un lugar adecuado para instalar una planta desaladora por los valores bajos que se tienen de indicadores de impacto antropogénico (detergentes y coliformes, entre otros). Así mismo los valores de SDI encontrados indican que el agua de mar de esta zona prácticamente no requiere un pretratamiento por mostrar valores cercanos a 5 unidades.

5) Aunque el costo de las membranas impregnadas con metal resultan un 32% superior a las membranas poliméricas de nanofiltración comerciales, estas últimas se consideran desechables después de un año de vida útil, en plantas industriales. En cambio las membranas cerámicas impregnadas con metal, aunque tengan un costo inicial mayor, tienen la capacidad de ser regeneradas e incrementar su tiempo de vida al menos al doble del tiempo de vida de las membranas

poliméricas. Tomando en cuenta esta estimación, las membranas cerámicas serían en realidad un 35% más económicas que las poliméricas.

6) Como las membranas cerámicas impregnadas operan con un 25% de consumo energético del total de energía que usa la membrana de OI y tienen una remoción de casi 30% de SDT, se estima que si se utiliza el sistema propuesto de membranas cerámicas como etapa previa de desalinización se pueden bajar los costos, además del ahorro por la mayor durabilidad de las membranas cerámicas.

7) Otros beneficios son el ambiental y el social. Como el tiempo de vida de las membranas cerámicas es superior y se pueden regenerar muchas veces, el impacto ambiental por la generación de residuos sólidos se verá disminuido sustancialmente comparado a membranas poliméricas. Por otro lado, al bajar el costo de la desalación y ser una tecnología con menores impactos ambientales, se logrará un beneficio social, al permitir poner al alcance de una mayor población la tecnología de desalación y así aumentar el abasto de agua, principalmente en zonas con problemas de escasez o falta de infraestructura de abasto de agua potable.

## VI.- RECOMENDACIONES

Para que los resultados de este trabajo se puedan utilizar en procesos de desalinización a nivel industrial, se recomienda lo siguiente:

1) Escalamiento a nivel industrial del sistema propuesto de reactor a membrana, y realización del análisis detallado de dimensionamiento y determinación de los costos industriales del proceso de desmineralización.

2) Utilización del sistema propuesto escalado como etapa previa a la desalación por ósmosis inversa y determinación de costos detallados.

3) Consideración de las características locales de la calidad del agua, factores sociales y ambientales, además de los económicos para la implementación de tecnologías de desmineralización si se pretende utilizar agua de mar de una zona diferente a la caracterizada en este trabajo.

4) Verificación que no haya variaciones significativas en la calidad del agua en la zona de estudio por desastres naturales como ciclones o lluvias atípicas, en un horizonte de tiempo mayor, pues este proyecto se llevó a cabo durante 12 meses. De existir estas variaciones, se debe tener en cuenta que hay probabilidad de tener que implementar un pretratamiento antes de utilizar desalación por tecnología de membranas.

5) Realizar estudio de impacto ambiental por el vertido de salmueras en el ecosistema propio donde se instale la planta. Hay que considerar que la desalación es una medida última para aumentar la disponibilidad de agua, una vez agotados los métodos de reutilización, ahorro y tratamiento de agua.

6) Considerar el aprovechamiento del residuo de alta concentración de sales obtenido en los procesos de desalación por membrana, para obtención de sal o hipoclorito de sodio y reducir su impacto ambiental.

7) Desarrollar estudios de los procesos presentados utilizando fuentes alternas de energía como energía solar o eólica y dispositivos para la recuperación de energía.

## VII.- LITERATURA CITADA

- Abdul-Wahab, S. y Al-Weshahi, M. 2009. Brine Management: Substituting Chlorine with On-Site Produced Sodium Hypochlorite for Environmentally Improved Desalination Processes. *Water Resources Management* 23:2437–2454
- Al-Zoubi, H. y Omar, W. 2009. Rejection of salt mixtures from high saline by nanofiltration membranes. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 26 (3): 799-805.
- Brehant, A., Bonnelye, V. y Perez, M. 2002. Comparision of MF/UF pretreatment with conventional filtration prior to RO membranes for surface seawater desalination. *Desalination*. 144: 353-360
- Cifuentes, J., Torres, M. y Frías M. 1997. El océano y sus recursos. Fondo de Cultura Económica. México.
- Comisión estatal de agua de Baja California. 2011. [www.cea.gob.mx](http://www.cea.gob.mx).
- CONAGUA. 2010. Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua. México.
- Correa, F. 2007. Evaluación de la sustentabilidad en la instalación de plantas desaladoras, de agua de mar, en la región noroeste de México. Tesis doctoral. Universidad de las Palmas de Gran Canaria, España.
- Cheverreau, E., Zouaoui, N., Limousy, L., Dutournié, P., Déon, S. y Bourseau, P. 2010. Surface properties of ceramic ultrafiltration TiO<sub>2</sub> membranes: effects of surface equilibriums on salt retention. *Desalination*. 255: 1-8.

- Delcroix T., McPhaden M., Dessier A., Gouriou Y., 2005. Time and space scales for sea surface salinity in the tropical oceans, *Deep Sea Research (Part I Oceanographic Research Papers)* 52: 787-813
- Den, W. y Wang, Ch. 2008. Removal of silica from brackish water by electrocoagulation pretreatment to prevent fouling of reverse osmosis membranes. *Separation and Purification Technology* 59: 318-325.
- Déon, S., Dutournié, P. y Bourseau, P. 2007. Transfer of monovalent salts through nanofiltration membranes: a model combining transport through pores and the polarization layer. *Industrial Engineering Chemistry Resources*. 46: 6752-6761.
- Drioli, E., Criscuoli, A. y Curcio, E. 2002. Integrated membrane operations for seawater desalination. *Desalination*. 147: 77-81.
- Dow Chemical 2010. Información técnica. [www.dowwatersolutions.com](http://www.dowwatersolutions.com).
- Duke, M., Mee, S. y da Costa, J. 2007. Performance of porous inorganic membranes in non-osmotic desalination. *Water Research*. 41: 3998-4004.
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T. y Melin, T. 2007. State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*. 216: 1-76.
- Fujiwara N. y Matsuyama H., 2008. Elimination of biological fouling in seawater reverse osmosis desalination plants. *Desalination* 227. 295-305
- Gabelich, C., Williams, M., Rahardianto, A., Franklin, J. y Cohen Y. 2007. High-recovery reverse osmosis desalination using intermediate chemical demineralization. *Journal of Membrane Science*. 301: 131-141



- Gray, G., McCutcheon, J. y Elimelech, M. 2006. Internal concentration polarization in forward osmosis: role of membrane orientation. *Desalination* 197: 1–8
- Greenlee, L., Lawler, D., Freeman, B., Marrot, B. y Moulin, P. 2009. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*. 43: 2317-2348.
- Guerrero, M. 1991 *El agua*. Fondo de cultura económica. México.
- Guler, E., Ozadag, D., Arda, M., Yuksel, M. y Kabay, N. 2010. Effect of temperature on seawater desalination-water quality analyses for desalinated seawater for use as drinking and irrigation water. *Environmental Geochemical Health*. 32:335-339.
- Hajbi, F., Hammi, H. y M'nif, A. 2010. Reuse of RO Desalination Plant Reject Brine. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. Publicado en línea 06 mayo 2010. ASM International.
- Heijman, S., Guo, H., Li, S., van Dijk, J. y Wessels, L. 2009. Zero liquid discharge: Heading for 99% recovery in nanofiltration and reverse osmosis. *Desalination*. 236: 357-362.
- Hilal, N., Al-Zoubi, H., Mohammad, A. y Darwish, N. 2005. Nanofiltration of highly concentrated salt solutions up to seawater salinity. *Desalination*. 184: 315-326.
- Hydranautics. 2010. Información técnica. [www-pure-aqua.com](http://www-pure-aqua.com).
- IMTA. 2007. Conocimiento y tecnología para la gestión sustentable del agua: informe 2007. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.

- Karagiannis, I. y Soldatos, P. 2008. Water desalination cost literature: review and assesment. *Desalination*. 223: 448-456.
- Kumar, M., Adham, S. y Pearce, W. 2006. Investigation of seawater reverse osmosis fouling and its relationship to pre-treatment type. *Enviromental Science Technology*. 40: 2037-2044.
- Lee, J., Johir, m., Chinu, K., Shon, H., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., Kim, C. y Shaw, K. 2009. Hybrid filtration method for pre-treatment of seawater reverse osmosis (SWRO). *Desalination*. 247: 15-24.
- Lee, K. P., Arnot, T. C. and Mattia, D., 2011. A review of reverse osmosis membrane materials for desalination-Development to date and future potential. *Journal of Membrane Science*, 370 (1-2): 1-22.
- Li, L., Dong, J., Nenoff, T. y Lee, R. 2004. Reverse osmosis of ionic aqueous solutions on MFI zeolite membrane. *Desalination*. 170: 309-316.
- Macedonio, F., Curcio, E., Drioli, E., 2007. Integrated membrane systems for seawater desalination: energetic and exergetic analysis, economic evaluation, experimental study, *Desalination* 203 260-276
- Mallevalle, J., Odendaal, P. y Wiesner, M. 1998. *Tratamientos del agua por procesos de membrana: Principios, procesos y aplicaciones*. McGraw Hill. España.
- Mazzoni, C., Orlandini, F. y Bandini, S. 2009. Role of electrolyte type on TiO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> nanofiltration membranes performances. *Desalination*. 240: 227-235.
- Meerganz von Medeazza, G. 2005. "Direct" and socially-induced environmental impacts of desalination. *Desalination*. 185: 57-70.

- National Geographic. 2010. Edición especial: Agua, un mundo sediento. National Geographic. México.
- Nava C. y Hiriart, G. 2008. Desalación de agua con energías renovables. Instituto de Ingeniería, UNAM. México.
- Nordin, A. y Jönsson, A. 2009. Flux and energy requirement during ultrafiltration of a complex industrial process stream. *Desalination and Water Treatment*. 2: 317-324.
- Oh, H., Hwang, T. y Lee, S. 2009. A simplified simulation model of RO systems for seawater desalination. *Desalination*. 238: 128-139.
- Oki, T. y Kanae, Sh. 2006. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *Science*. 313: 1068-1072.
- ONU. 2009. Water in a changing world, 3<sup>rd</sup>. World Water Development Report, UNESCO.
- Pearce G., Taló, S., Chida, K., Basha, A. y Gulamhusein, A. 2004 Pre-treatment options for large scale SWRO plants: case study of UF trials at Kindasa, Saudi Arabia and conventional pre-treatment in Spain. *Desalination*. 167: 175-189.
- Pérez, V., Miachon, S., Dalmon, J., Bredesen, R., Pettersen, G., Raeder, H. y Simon, Ch. 2001. Preparation and characterisation of a Pt/ceramic catalytic membrane. *Separation and Purification Technology*. 25 (1-3): 33-38.
- Presidencia de la República. 2010. [www.presidencia.gob.mx](http://www.presidencia.gob.mx).

- Ramdhanié I. y Riverol, C. 2007. Technical evaluation of a reverse osmosis desalination plant in the Caribbean: a case study. *Chemical Engineering Research and Design*. 85 (A3): 365-376.
- Ramírez-Herrera, M., Cundy, A., Kostoglodov, V., Carranza-Edwards, A., Morales E. y Metcalfe S. 2007. Sedimentary record of late-Holocene relative sea-level change and tectonic deformation from the Guerrero Seismic Gap, Mexican Pacific Coast. *The Holocene*. 17 (8): 1211-1220.
- Rojas, R. 2002. Guía para la vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Perú.
- Shirazi, S., Lin, Ch. Y Chen, D. 2010. Inorganic fouling of pressure-driven membrane processes- A critical review. *Desalination*. 250: 236-248.
- SEMARNAT. 2010. [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx)
- Triwahyono, S., Jalil, A., Nur, H., Hamdan, H. y Kobayashi, M. 2006. Development of membrane reactor for epoxidation of propylene to propylene oxide in a single step process. *Journal of the Institution of Engineers*. 67 (3): 7-12.
- Velizarov, S., Crespo, J. y Reis, M. 2004. Removal of inorganic anions from drinking water supplies by membrane bio/processes. *Reviews in Environmental Science & Bio/Technology*. 3: 361-380.
- Vörösmarty Ch., Green, P., Salisbury, J. y Lammers, R. 2000. Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science*. 289: 284-288.
- Water Environment Federation. 2006. *Membrane Systems for Wastewater Treatment*. McGraw Hill. EUA.

- Wilf, M. y Bartels, C. 2005. Optimization of seawater RO systems design. *Desalination*. 173-1: 1-12.
- Yang, H., Lin, J. y Huang, C. 2009. Application of nanosilver surface modification to RO membrane and spacer for mitigating biofouling in seawater desalination. *Water Research*. 43: 3777-3786.
- Yiantsios, S., Sioutopoulos, D. y Karabelas, A. 2005 Colloid fouling of RO membranes: an overview of key issues and efforts to develop improved prediction techniques. *Desalination*. 183: 257-272.
- Zhang, L., Park, I., Shqau, K, Winston-Ho, W. y Verweij, H. 2009. Supported Inorganic Membranes: Promises and Challenges. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. 61 (4): 61-71.

## APENDICES

### APENDICE1: PERSPECTIVAS Y REQUERIMIENTOS DE DESALINIZACION DE AGUAS MARINAS Y SALOBRES EN MEXICO

(Revisión realizada dentro del proyecto CONACYT-CONAGUA -2008 86136, del cual surgió esta tesis)

#### 1.- INTRODUCCION

Aunque aproximadamente sólo el 0.6% de toda el agua en el planeta se puede disponer para consumo humano -por ser agua dulce y no estar congelada ni en la atmósfera o seres vivos-, esta cantidad sería suficiente para abastecer las necesidades actuales y a mediano futuro de la población humana. Sin embargo existe un problema de escasez, que consiste en que no hay una distribución homogénea del agua, ni en tiempo ni en espacio. Existen zonas y/o periodos con muy poca agua disponible. El 50% del agua dulce disponible se concentra en siete países (Brasil, Rusia, Estados Unidos, Canadá, Indonesia, China y Colombia) mientras que otros países como Egipto o Sudáfrica la tienen que importar. Un ejemplo de la heterogeneidad durante el año es la cantidad de lluvia que cae en la India; en época de monzones (junio a septiembre) cae aproximadamente el 85% del total anual. De igual manera la disponibilidad y consumo de agua varía, pues mientras los habitantes de algunos países desarrollados usan casi 400 L (litros) al día, en algunas regiones pobres subsisten con menos de 19 L/día.

El problema de escasez de agua en ciertas zonas o temporadas irá incrementándose en el futuro y expandiéndose a zonas donde actualmente no existe tal escasez. La población humana ha estado en constante crecimiento, haciendo crecer de igual manera la demanda de este recurso, por el mayor desarrollo social y económico que genera mayores demandas de agua para uso industrial, agrícola y de servicio, así como por adaptación de nuevos estilos de vida. Además, muchas actividades humanas han tenido efecto negativo en el ciclo natural del agua ya sea directamente como contaminación, sobreexplotación y cambio climático, o indirectamente como cambios en el uso del suelo y alteraciones en las zonas de captación de las cuencas, ocasionados principalmente por la deforestación, erosión y crecimiento urbano.

Las aguas subterráneas abastecen aproximadamente el 30% de la población mundial y para que este recurso sea sostenible es necesario mantener un equilibrio entre la extracción y la recarga, que no se ha dado en la mayoría de los casos. La sobreexplotación de acuíferos ha ocasionado no sólo la disminución de cantidad, sino también de la calidad principalmente por intrusión salina en acuíferos costeros y la migración de agua fósil de mala cantidad. El mismo caso ocurre en muchos cuerpos superficiales de agua donde los caudales se han ido reduciendo y en algunas zonas no se pueden aprovechar por la contaminación.

En la mayoría de los países el agua ha sido responsabilidad del Estado: política e históricamente los grandes proyectos para aumentar el abastecimiento del agua han sido preferidos a las medidas para conservar el agua y mejorar la eficiencia en su uso. Todos los gobiernos del mundo han subsidiado el costo de abastecimiento del agua por ser un recurso estratégico y proteger a los usuarios. En muchas regiones del mundo se presentan ya problemas crónicos de escasez e incluso hay tensiones cuando se comparten ríos o acuíferos. Un ejemplo es el caso de Egipto, Sudán y Etiopía quienes se enfrentan por el control del río Nilo, o el problema entre México y Estados Unidos por los ríos Colorado y Bravo.

En países y regiones con alta escasez de agua dulce, una de las alternativas para aumentar la cantidad de agua es la desalinización que se ha desarrollado desde los años 50's de aguas salobres y marinas. Este proceso consiste en eliminar las sustancias disueltas en el agua para poderla utilizar en las actividades humanas. Los procesos de desalinización se comenzaron a utilizar en los países de Medio Oriente, utilizando energía térmica de combustibles fósiles para evaporar el agua y recuperarla. La desalación de agua de mar en la mayoría de los casos resultaba costosa por la utilización de combustibles fósiles, así que países que carecen de dicho combustible y tienen acceso a agua marina se vieron motivados para incorporar energías renovables en el proceso.

Desde los años 70's se han implementado tecnologías a membrana para separar la materia disuelta en el agua y obtener un producto con menor cantidad de estas sustancias para poder ser utilizado en las diferentes actividades. Existen actualmente diferentes líneas de investigación para optimizar los procesos de desalinización existentes, usando fuentes alternativas de energía y nuevas tecnologías.

## **2- EL PROBLEMA DE ESCASEZ DE AGUA EN MÉXICO**

### **2.1 SITUACIÓN ACTUAL.**

El panorama en México tiene el mismo patrón que el mundial. En México, aproximadamente el 45% del agua para todos los usos proviene de aguas superficiales, el 27% de aguas subterráneas y el resto es de aprovechamiento directo de las lluvias (temporal). Sin embargo para el uso doméstico e industrial el 70% proviene del subsuelo y abastece a aproximadamente 78 millones de personas. La problemática del agua en nuestro país se puede agrupar en tres grandes rubros:

- 1) Distribución desigual del recurso en relación a las poblaciones y actividades humanas;
- 2) Creciente deterioro de la calidad debido a contaminación y sobreexplotación; y
- 3) Problemas de escasez (estrés hídrico) en algunas regiones.

***Distribución desigual.*** Los recursos de agua renovable o disponible de una región o país se refieren a la cantidad de agua máxima que es factible explotar anualmente, es decir, la cantidad de agua que es renovada por la lluvia y por el agua proveniente de otras regiones o países (importaciones) La disponibilidad natural del agua en el país presenta marcados contrastes ocasionados por la intensidad variable con la que se da la ocurrencia del recurso y la ubicación de las diversas poblaciones; así como la heterogénea distribución de lluvias en las diferentes zonas y durante el año. El país se puede dividir en dos zonas: zona norte-centro y zona sur. En la primera zona la disponibilidad del recurso es del 32%, pero con una población que equivale al 77% y un PIB equivalente al 85%. En la región sur, la disponibilidad es del 68%, con un 23% de la población y sólo un 15% del PIB. La disponibilidad en la zona norte-centro es de 1,835 m<sup>3</sup> por habitante al año mientras que en la segunda zona es de 13,290 m<sup>3</sup> por habitante (Figura 1). Además en un año, el 67% de las precipitaciones pluviales en todo el país, ocurren entre junio y septiembre, lo que dificulta su almacenamiento y aprovechamiento, además que dichas lluvias ocurren mayormente en la zona sur del país. La precipitación media, de alrededor de 780 mm anuales es un valor engañoso, pues mientras en la zona sur, se registran valores cercanos a 2 000 mm anuales, en el norte sólo se precipitan apenas 250 mm al año.

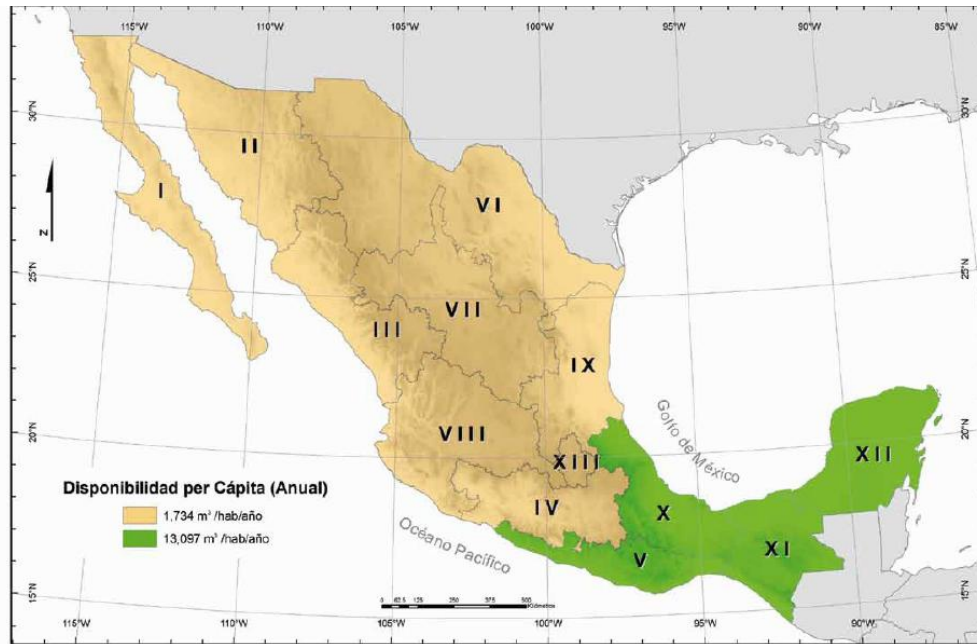


Figura 1.- Disponibilidad de agua por habitantes en las regiones hidrológicas-administrativas

**Deterioro de la calidad.** La contaminación ha provocado que aproximadamente 24% de los cuerpos superficiales se encuentren en el rango de contaminados a altamente contaminados, el 49% como medianamente a poco contaminados y solo el 27% presente una calidad satisfactoria (del cual sólo el 5% se califica como excelente). Respecto al agua subterránea, el 80% presenta buena calidad, aunque se han identificado 40 acuíferos con cierta degradación y de los cuales 17 deteriorados o modificados por intrusión salina (Figura 2). La cantidad de acuíferos degradados ha aumentado en los años recientes como se ve en la Tabla 1.



Figura 2.- Zonas geográficas donde se indican las zonas con contaminación de aguas subterráneas salobres y con infiltración salina marina

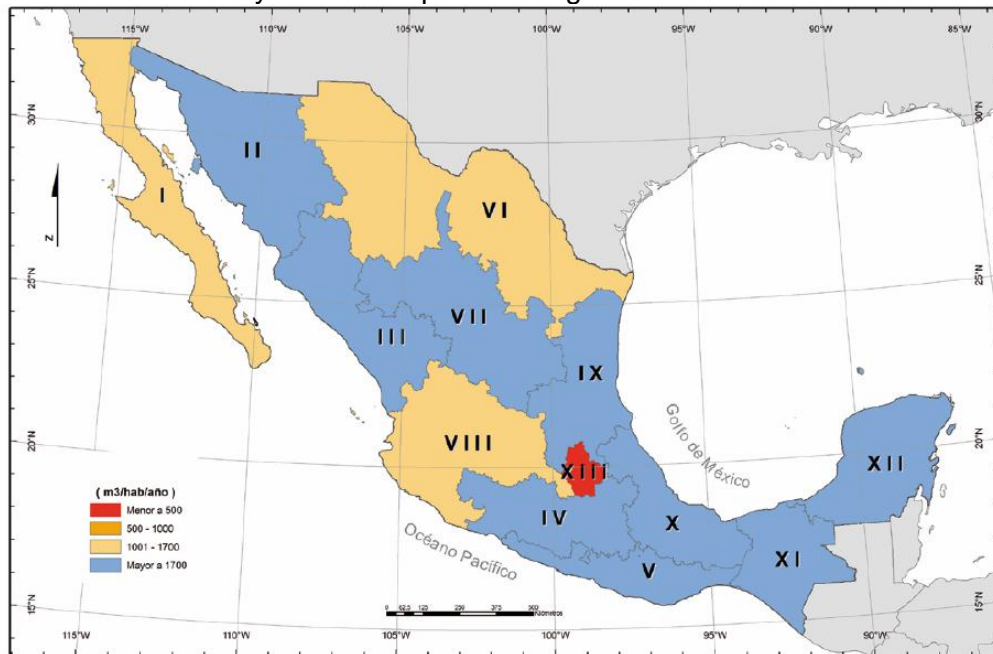


**Tabla 1.-** Cantidad de acuíferos con problemas de sobreexplotación y con problemas de contaminación por salinidad

Año	1975	1981	1985	2001	2003	2006	2008
Acuíferos sobreexplotados	32	36	80	96	104	101	101
Acuíferos con problemas de intrusión salina	N.R.*	N.R.	N.R.	17	17	17	16
Acuíferos con problemas de salinidad o salobres	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	13	17	32

\*N.R. No Reportado

**Estrés hídrico y grado de presión.** El estrés hídrico de un acuífero es un parámetro para medir si la demanda es mayor que la cantidad disponible durante un periodo. Se considera que un país o región vive en estado de estrés hídrico si su agua renovable es de 1,700 m<sup>3</sup>/hab/año o menos (Figura 3). El grado de presión sobre un acuífero es el porcentaje de recuperación de un acuífero contra la demanda. Un acuífero se considera sobreexplotado cuando la extracción es mayor en 10% que la recarga.



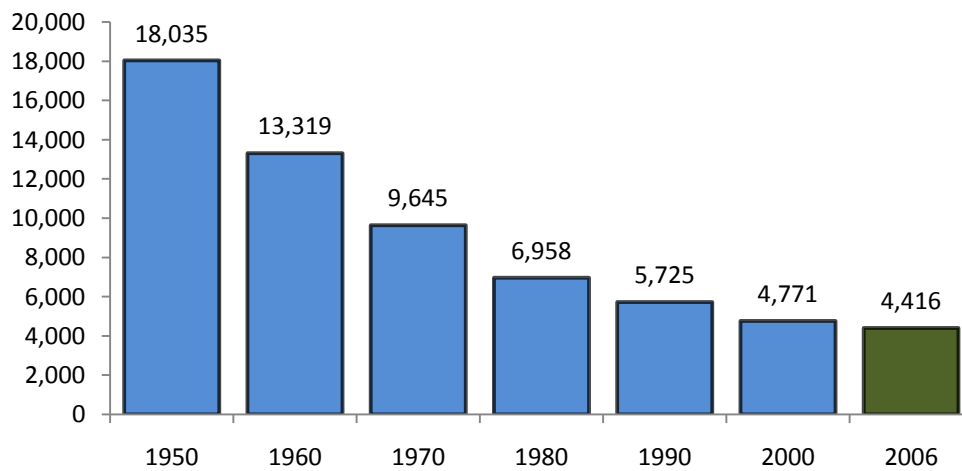
**Figura 3.-** Nivel de estrés hídrico por región hidrológica administrativa

Actualmente en el país, hay 653 acuíferos, de los cuáles 101 se encuentran sobreexplotados. De éstos acuíferos sobreexplotados se extrae el 60% del agua subterránea para todos los usos y abastecen a muchas de las grandes ciudades del país (Figura 4). Además, la deforestación contribuye a la menor infiltración de agua hacia los acuíferos y acelera la pérdida de suelos. La sobreexplotación ha aumentado considerablemente en los últimos 40 años.



**Figura 4.-** Zonas geográficas donde se muestran las zonas con sobreexplotación de aguas subterráneas

**Disponibilidad natural media per cápita**, Es la cantidad de agua disponible en promedio al año dividido entre número de habitantes, sin importar el uso que se le dé al agua. Desde el año 2000 se tienen valores promedio considerados bajos, menores a 5,000 (Figura 5). Para 2010 el promedio estimado es 4200-4300 m<sup>3</sup>/hab/año. En algunas zonas del país es incluso menor a 1000 (Figura 6).



**Figura 5.-** Evolución de la disponibilidad en México (m<sup>3</sup>/ hab – año)



Figura 6.- Grado de presión por región hidrológica-administrativa

**Problemas sociales.** El manejo del agua en México es también competencia del gobierno y muchas veces los problemas de abasto, contaminación y sobreexplotación son de índole política. Al igual que a nivel global, en el país se presentan algunos casos donde hay conflictos entre diferentes estados o municipios o entre diferentes niveles de gobierno por el manejo de algún acuífero. Un ejemplo es el río Lerma en el que hay conflicto entre agricultores, gobierno federal y los gobiernos de los estados de México, Querétaro, Michoacán, Guanajuato y Jalisco.

## 2.2 PANORAMA FUTURO.

**Crecimiento poblacional y económico.** La gestión de los recursos hídricos en México se complicará en los próximos años como resultado del crecimiento demográfico y del desarrollo económico, que típicamente incrementa el consumo per cápita. Al incrementarse la demanda de agua no sólo por el crecimiento de la población sino también en gran medida de la agricultura –por el crecimiento en la infraestructura de riego-, se configura un escenario de creciente escasez en algunas zonas del país, al combinarse con la menor disponibilidad natural. La disponibilidad del agua por habitante en México ha venido disminuyendo, en especial en los últimos 40 años y se prevé que siga disminuyendo (Figura 7). La disponibilidad media *per cápita* pasará de 13,319 m<sup>3</sup>/hab/año en 1960 a 3,793 m<sup>3</sup>/hab/año en el año 2030, lo que generará una mayor escasez en las zonas áridas y semiáridas (Tabla 2).

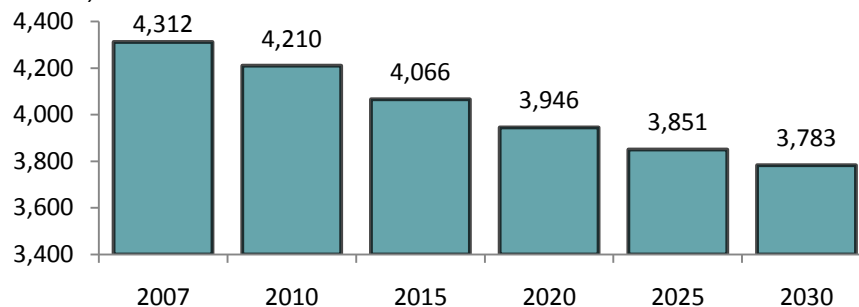


Figura 7.- Proyecciones de la disponibilidad natural media per cápita en México (m<sup>3</sup> / hab – año)

Tabla 2.- Proyección de la disponibilidad del agua per cápita por región hidrológica-administrativa

No.	Region Hidrológico-Administrativa	Poblacion (miles) 2010*	Disponibilidad m <sup>3</sup> /hab/año	Poblacion (miles) 2030*	Disponibilidad m <sup>3</sup> /hab/año	Incremento de poblacion esperado*
I	Península de Baja California	3882	1289	5915	780	2033
II	Noroeste	2635	3192	2910	2819	275
III	Pacífico Norte	3959	6471	3795	6753	-164
IV	Balsas	10666	2055	11127	1946	461
V	Pacífico Sur	4131	7960	4022	8154	-110
VI	Río Bravo	11117	1124	13252	907	2135
VII	Cuencas Centrales del Norte	4217	1888	4568	1703	351
VIII	Lerma Santiago Pacífico	21141	1650	23512	1448	2371
IX	Golfo Norte	4981	5162	5099	5001	118
X	Golfo Centro	9677	9964	9925	9618	248
XI	Frontera Sur	6674	24270	7498	21039	823
XII	Península de Yucatan	4145	4063	5807	5105	1662
XIII	Aguas de Valle de México	21582	143	23673	127	2091
<b>TOTAL</b>		108808	4312	121104	3783	12295

\*\*Datos de población interpolados al 31 de diciembre de cada año, estimados en 2007

**Cambio climático.** Aunado a la escasez de agua por habitante, el cambio climático puede tener también efectos adversos. Diversas estimaciones coinciden en un aumento de la temperatura, hacia finales de este siglo XXI, de 3 a 4 °C. Esto ocasionará alteraciones en las precipitaciones, principalmente en el norte del país, con sequías más recurrentes e intensas y una disminución en el escurrimiento, y se estima que en algunas regiones será cercano al 20%. También en la zona sur se prevén menores precipitaciones y por tanto menores volúmenes disponibles, que pueden afectar incluso la generación de energía. Por otra parte, se pronostica que las tormentas tropicales aumenten su intensidad, no así su frecuencia. Se observarán más huracanes de categorías cuatro y cinco. El incremento global del nivel del mar, propiciará en las costas de México la vulnerabilidad de algunas regiones a las inundaciones, al disminuir la capacidad de descarga de los cauces. Se espera que el incremento del nivel del mar aumente también la salinización de los acuíferos costeros. En las regiones áridas del norte-centro del país, es previsible un aumento en frecuencia e intensidad de las sequías. Deberá prestarse especial atención a las cuencas de los ríos en la región norte, en especial en el del Bravo y la costa del Golfo de California (Sonora y Baja California). El crecimiento demográfico, por sí solo, ocasionará una disminución de tal magnitud en la disponibilidad, que las regiones de la península de Baja California y del río Bravo cambiarán su clasificación de disponibilidad media *per cápita* de muy baja a extremadamente baja, es decir inferior a mil metros cúbicos anuales. Esto sin considerar el efecto del cambio climático.

**Control de la contaminación.** Respecto a la contaminación, se espera que haya una mayor regulación y control de las fuentes antropogénicas, llegando a mediados del siglo a un 100% de tratamiento. Sin embargo debido a la sobreexplotación de acuíferos y a los menores escurrimientos, algunas fuentes de abastecimiento podrían sufrir contaminación natural por intrusión salina o presencia de metales por tener un contenido de aguas fósiles.

Se estima que faltarían aproximadamente 10,000 millones de m<sup>3</sup> para 2030, considerando los niveles actuales de disponibilidad de agua y considerando únicamente el incremento de población y de la economía. Si los niveles de agua disponible se vieran disminuidos por contaminación, cambio climático y sobreexplotación, la cantidad faltante sería mucho mayor. La gestión del agua en el futuro, supondrá retos aún mayores. Para garantizar la disponibilidad de agua para las futuras generaciones es fundamental comprender la

naturaleza compleja del problema y tener un enfoque integrador del manejo de este recurso, considerando aspectos sociales, políticos, legales, ecológicos y culturales e incorporando una visión de largo plazo. Además es necesario que los administradores de recursos hidráulicos tengan en cuenta los escenarios de cambio climático, de lo contrario podrían establecer estrategias de alcance insuficiente para adaptar los sistemas hídricos a la situación prevista con base en los estudios realizados.

### **3.- PROCESOS DE DESALINIZACIÓN.**

De acuerdo a lo anterior, se requiere un sistema de soluciones para este problema complejo. Dentro de esta matriz de soluciones, una de ellas es aumentar la cantidad de agua de buena calidad. Una de las tecnologías que permite aumentarla es la desalinización, ya sea de aguas continentales o de agua de mar. El agua de mar es la más abundante y no se puede utilizar para casi ninguna actividad humana (consumo, riego, higiene o industria) por la cantidad de sustancias minerales que tiene en solución, por lo que un proceso de desalinización incrementa la disponibilidad de agua de buena calidad. De igual manera existen aguas continentales –superficiales o subterráneas- no aprovechables, por tener también sales en solución. La salinidad del agua está en función del tipo de sales que contenga. Éstas pueden ser cloruro de sodio, u otras como carbonatos, sulfatos silicatos, etcétera y no sólo de sodio sino de otros metales. Al analizar el agua, un valor que indica la cantidad de sustancias disueltas es el de sólidos disueltos totales (SDT). Existen otros valores como son la conductividad eléctrica o el % de salinidad.

#### **3.1 PROCESOS CONVENCIONALES DE DESALINIZACIÓN.**

La desalinización o desalación es el proceso de eliminar del agua la cantidad excesiva de sales que contenga, pudiendo llegar incluso a valores tan bajos que a veces es necesario darle un postratamiento para que sea apta para transporte y uso o consumo. La desalinización ocasiona varios problemas como son el alto costo de su proceso, la contaminación que genera al ambiente, los requerimientos de energía a gran escala y una dependencia aún mayor de las energías fósiles. El proceso de desalinización solo debe proceder respecto a las aquellas aguas que presentan una relación de costo-beneficio al corto plazo muy conveniente.

Las tecnologías actualmente empleadas para la desalinización pueden clasificarse en dos tipos: térmicas y por membranas.

Los procesos térmicos o de destilación se basan en la separación del agua mediante evaporación y la condensación posterior de dicho vapor. Se realiza en un alambique, con más o menos complejidad. La forma de aportar la energía necesaria para lograr el cambio de estado y los sistemas de recuperación del calor latente del vapor al condensarse, diferenciarán unos procesos de otros.

En la separación por membranas, el agua salina o salobre pasa por una membrana que retiene las sales junto con parte del agua, dejando pasar la otra parte del agua prácticamente libre de sales. Los procesos con membranas son principalmente ósmosis inversa (OI) y en mucho menor grado nanofiltración (NF) y electrodiálisis (ED).

**Destilación abierta** Se trataba de simples alambiques. Posteriormente se fue mejorando el proceso hasta llegar a los evaporadores de varias etapas y recirculación de salmuera, que son los utilizados en la actualidad. En el esfuerzo por disminuir el consumo se ha intentado superar el límite de 120 °C, marcado actualmente por la precipitación de ciertas sales, pero no se ha logrado de forma económica. Por otro lado se está intentando disponer de evaporadores verticales para mejorar la transferencia de calor y otros parámetros de diseño, pero tampoco se han superado por el momento las dificultades que se tienen.

**Evaporación o destilación súbita por efecto “flash” o (MSF por sus siglas en inglés).** Consiste en una corriente de agua marina a alta temperatura que fluye a través del fondo de

un contenedor que cuenta con hasta 40 cámaras (o etapas). El vapor resultante se enfría con agua de mar (la cual se vuelve a alimentar al proceso), se purifica por medio de eliminadores de partículas suspendidas y se recolecta y hay una cantidad de salmuera que se desecha. Las plantas MSF se caracterizan por requerir altos volúmenes y flujo de agua disponible para tratar, presentan problemas de corrosión y mineralización e implican altas tasas de uso de químicos en el tratamiento del agua.

**Destilación de efecto múltiple (MED).** Se genera vapor, el cual es enviado por tubos donde se condensa y del otro lado se encuentra el agua salada que distribuye sobre la superficie de otros tubos, lo que ocasiona la evaporación. La presión se reduce secuencialmente en cada etapa o tubo, a medida que la temperatura se reduce, pero sirve de precalentamiento a contracorriente para mejorar el desempeño del proceso. Los gases disueltos en el agua son ventilados fuera del sistema.

**Destilación de vapor comprimido.** Se comprime vapor de agua lo que causa condensación sobre una superficie de transferencia de calor (un tubo). Esto permite al calor de la condensación ser transferido a la salmuera del otro lado de la superficie resultando en la vaporización de esta. El compresor no sólo aumenta la presión en el lado del vapor, sino que baja la presión del lado del agua salada para bajar su temperatura de ebullición y mejorar la evaporación.

**Electrodialisis.** La ED es un proceso que se basa en la separación de iones por una membrana cargada, haciendo que los iones se separen del solvente, al ser arrastrados por las cargas electrostáticas en polos de la membrana.

**Osmosis inversa.** Se basa en la propiedad de ciertas membranas llamada semipermeabilidad, que permite el paso del agua y lo impide a las sustancias disueltas. En la ósmosis normal el agua tendería a pasar de una solución diluida a una solución concentrada atravesando una membrana hasta lograr un equilibrio en la presión osmótica en ambas fases y lo haría de manera espontánea. En el caso de OI, se aplica una presión mayor a la presión osmótica para que el agua pase de la fase concentrada a la diluida. A mayor concentración de sales se necesita aplicar mayor presión. En este tipo de separación, el agua a filtrar no va en forma perpendicular al medio filtrante, sino que lo hace de manera longitudinal. A esto se le llama flujo cruzado o tangencial y hace que el material eliminado no se queda en la membrana sino se queda en una fase concentrada, que es arrastrada. Es decir que se tienen dos salidas y no se recupera jamás el 100%. A la entrada del agua se le llama agua de alimentación, al agua libre de sales se le llama permeado o agua producto y al agua de residuo del proceso, se le llama agua rechazo o salmuera por tener un porcentaje alto de sales y que se puede recircular para tratar de recuperar más sales.

### 3.2 USO DE FUENTES ALTERNATIVAS DE ENERGÍA.

Actualmente son muchos los proyectos e investigaciones que se llevan a cabo para una mejora de los sistemas de desalación y sobre todo utilizando fuentes de energía más sostenibles y económicas. La viabilidad económica de estos procesos depende de los recursos potenciales de energías renovables en la región a analizar, por ello no todos los países pueden utilizar dichas tecnologías. Solo lo pueden hacer los países que poseen en abundancia estas fuentes alternas. Se propone en estas zonas construir desaladoras que consuman electricidad o energía térmica generada mediante sistemas de energías renovables, como solar, eólica, biomasa, geotérmica, mareomotriz, nuclear o combinación de varias de ellas. Estos procesos pretenden mejorar el abasto y distribución de agua potable para el consumo humano, agrícola, industrial y de servicios, satisfacer la demanda de energía eléctrica y disminuir la contaminación que se emite al generar energía eléctrica mediante la combustión de hidrocarburos.

**Energía solar.** La energía del sol se puede utilizar tanto de manera directa para evaporar el agua como para la generación de electricidad (celdas fotovoltaicas). Normalmente no es una energía que se use como única fuente en instalaciones de gran capacidad, pero sí es una alternativa para usarse en zonas de alta incidencia solar y para plantas de pequeña escala. Algunas plantas desalinizadoras utilizan en su proceso energía solar y eólica, o bien se emplea como fuente de energía los hidrocarburos y la energía solar de forma combinada. En distintas regiones del mundo se cuentan con plantas de desalinización que utilizan energía solar, por ejemplo Kuwait tienen una planta con capacidad de 100 m<sup>3</sup>/día, Alemania cuenta con una planta con capacidad de 10m<sup>3</sup>/día la cual funciona con energía solar de manera parcial.

**Energía eólica.** La energía del viento para generar electricidad todavía está poco difundida, sin embargo su utilización va en aumento. Como se mencionó en el ejemplo anterior, existen plantas que funcionan con energía eólica y solar. La energía eólica requiere que la región donde se pretenda establecer las plantas desaladoras cuente con condiciones suficientes para su viabilidad, pues es un proceso que requiere una vasta zona con velocidades de viento suficientes para el movimiento de las aspas de los generadores eólicos.

**Desaladoras marinas flotantes alimentadas por energía eólica.** Existen investigaciones consistentes en construir plataformas desaladoras flotantes en alta mar impulsadas por energía eólica. La idea destaca por el alto rendimiento energético y la nula emisión contaminante de las plataformas. La desalación de agua marina en alta mar permitirá que la salmuera residual se vierta lejos del hábitat marino y quede totalmente diluida minimizando el posible impacto ambiental. Estas plataformas flotantes fondeadas podrán ser instaladas a distancias de entre cuatro a cinco kilómetros de la costa y en aguas de entre 40 a 80 metros de profundidad máxima. En las plataformas, se albergarán equipos de desalación de agua marina por ósmosis inversa sobre los que irán ubicados aerogeneradores eólicos capaces de producir anualmente agua suficiente para abastecer a una población.

**Utilización de biomasa.** La utilización de biomasa como fuente de energía (biogás) en las plantas de desalinización es poco viable, una razón es que donde se ubican dichas instalaciones son lugares que tienen poca humedad y por lo tanto poca vegetación, que es la principal materia prima. Sin embargo se podría utilizar la generación de energía por la biomasa de residuos, aunque complementado con otra fuente adicional de energía (solar, hidrocarburos, eólica, etc.).

**Energía geotérmica.** Técnica y económicamente es viable emplear la energía por el calor de la tierra para generar electricidad en la desalación de agua, ya que las plantas de energía geotérmica después de su inversión inicial presentan costos bajos para su mantenimiento y operación. Uno de los problemas de esta tecnología es que el agua calentada en el subsuelo muchas veces es corrosiva y no es posible su utilización.

**Energía mareomotriz.** Dicha energía se basa en el poder de las ondas marinas. Su costo de inversión inicial es elevado, sin embargo se ha demostrado que es económicamente viable aplicar un sistema mixto de energía mareomotriz y energía térmica proveniente del océano.

**Energía nuclear.** La desalación por energía nuclear ofrece una solución económicamente viable, principalmente en regiones donde se tienen necesidades de agua potable para el consumo urbano y agrícola en gran escala y que por situaciones locales, esta demanda sólo es posible satisfacerla desalando agua. La gran ventaja de la desalación nuclear es que la

producción de agua potable se realiza en forma cogenerada con la producción de energía eléctrica. Esto permite optimizar la utilización de la energía de la planta. La cogeneración también hace posible contar con cierta flexibilidad para decidir qué cantidad de energía se dedicará para producir electricidad y qué cantidad para la producción de agua potable, ajustándose a las necesidades de demanda que se presenten. Sin embargo el riesgo de contaminación no la hace una de las tecnologías que vaya en crecimiento para desalación.

***Desaladora con energía eólica, solar e hidráulica.*** Se ha diseñado un proyecto integral de una desaladora que realiza su función por ósmosis inversa usando energía eólica, solar e hidráulica. El prototipo se diseña para Arico (municipio de las Islas Canarias) y además puede reutilizar las sales para la industria farmacéutica. Esto permite el ahorro y la compensación de energía consumida en el proceso de desalación, permite la venta de energía eléctrica a la red amortizando y minimizando los costes del agua salada. Además, el modelo permite el almacenamiento por separado del agua para consumo humano y para la agricultura de forma que se puede adaptar el agua de uso agrícola a los tipos de cultivo y aportarle los nutrientes a cada fruta y verdura que necesite. El funcionamiento de estas plantas no altera el medio marino debido a los pozos de extracción de agua salada, ni tampoco la contaminación al utilizar pozos de vertido de salmuera resultante pues han diseñado un sistema para recuperar estos materiales y destinarlos a la industria farmacéutica o a la alimenticia.

### 3.3 NUEVAS TECNOLOGÍAS

Las fuentes alternas para generar electricidad y calor mencionadas anteriormente, siguen utilizando los procesos convencionales de destilación, filtración por membranas o electrodiálisis para la separación del agua de sus solutos. Adicionalmente, se están estudiando actualmente nuevas tecnologías que permitan en un futuro mejorar los procesos de desalinización.

#### ***Osmosis Forzada.***

Es un proceso similar al de la ósmosis inversa, ya que consiste en pasar el líquido por una membrana porosa hacia una solución más salada incluso mayor que la del agua de mar, pero con un tipo de sal que se evapora más rápidamente. Trabaja de manera distinta ya que no utiliza presión sino sales adecuadas que proporcionan la presión osmótica suficiente para que se pueda realizar el proceso, lo que ocurre es que sin ningún tipo de energía las moléculas de agua migran por acción de la osmosis natural hacia una solución de extracción, cuya sal especial es evaporada después con calor de baja temperatura.

#### ***Nanotecnología en el tratamiento de agua.***

La nanotecnología se refiere a una amplia gama de herramientas, técnicas y aplicaciones que utilizan partículas en la escala del tamaño de unos pocos cientos de nanómetros de diámetro. Esta área de investigación podría contribuir a encontrar soluciones para algunos de los principales problemas que enfrentamos a escala mundial, como garantizar el suministro de agua potable para una población creciente, así como abordar los problemas de la medicina, la energía y la agricultura. La depuración de agua mediante nanotecnología explota los materiales nanoscópicos como nanotubos de carbono y fibras de alúmina de nanofiltración, que también utilizan la existencia de poros nanoscópicos en las membranas de filtración de zeolita, así como nanocatalizadores y nanopartículas magnéticas. Los nanosensores en nanopartículas, como los basados en nanocables de óxido de titanio o



paladio se usan para la detección de análisis de contaminantes en muestras de agua. Esta tecnología puede ser utilizada para la remoción de sedimentos, los efluentes químicos, las partículas cargadas, las bacterias e incluso tóxicos como el arsénico.

Las principales ventajas de utilizar nanofiltros, en comparación con los sistemas convencionales, es que se requiere menos presión para pasar el agua a través del filtro, que son más eficientes, y tienen muy grandes superficies y pueden ser más fáciles de limpiar por retrolavado en comparación con los métodos convencionales. Por ejemplo, las membranas de nanotubos de carbono puede eliminar casi todos los tipos de contaminantes del agua incluyendo la turbidez, el aceite, las bacterias, virus y contaminantes orgánicos.

Mediante la nanotecnología es posible diseñar nuevos materiales, en el caso de tratamientos de agua ya sea para potabilización o depuración lo que nos permita el diseño de materiales nanoporosos que tengan potencial de adsorción, eficiencia, inocuidad, resistencia química pero sobre todo que sean materiales selectivos. Dichos materiales pueden tener poros de diámetros menores a 100 nm. En esta clasificación podemos encontrar a los nanotubos de carbono, cristales amorfos, silicón nanoporoso, etc. Estos materiales funcionan como filtros o bien permite el intercambio iónico. Estos materiales pueden contribuir entonces al tratamiento de agua mediante la agregación de grupos funcionales sobre diversas matrices como pudieran ser: zeolita, silicón mesoporoso y compuestos nanoporosos de carbono (CNT).

La zeolita posee poros y canales, los cuales están formados por canales de aluminio y silicio unidos mediante enlaces con oxígeno. Por medio de esta estructura es posible generar nuevos materiales mediante la sustitución de aluminio o silicio, dichos materiales tienen gran habilidad para realizar una catálisis ácido-base, dicho fenómeno puede aplicarse para el ablandamiento de agua dura esto se debe a que el material permite un intercambio iónico y adsorción, así como la separación o catálisis de ciertos contaminantes, con base a lo anterior la zeolita se considera una matriz ideal para el diseño de nuevos materiales. Estos materiales pueden ser diseñados a partir de modelos moleculares a nivel computacional con ayuda de un software apropiado, de esta manera es posible caracterizar la estructura de acuerdo a las necesidades del proceso, lo que permite modificaciones al material más precisa por ejemplo en su tamaño, ordenamiento de poros o adición de grupos funcionales a la superficie con el objetivo de crear puntos de catálisis selectiva.

Por otra parte el silicón mesoporoso es un material muy estable y con alto potencial para reusarse, además resulta muy eficiente en la remoción de metales pesados en especial al mercurio, mediante la agregación de capas de grupos funcionales. Por ejemplo los grupos tiol pueden ser depositados sobre la tremenda área superficial del material lo que lo hace muy selectivo.

### ***Nanotubos de carbono.***

A pesar de que sus poros son significativamente más pequeños, los nanotubos de carbono han demostrado tener igual o un flujo más rápido en comparación con los poros más grandes, posiblemente debido a la superficie interior lisa de los nanotubos. Los filtros de nanofibras de aluminio y otros materiales de nanofibras también eliminan los contaminantes

con carga negativa, como los virus, bacterias y coloides orgánicos e inorgánicos a un ritmo más rápido que los filtros convencionales

Se identifica un filtro como materia porosa que elimina los materiales que lleva en suspensión un líquido que pasa a través de él. Se han fabricado filtros mediante materiales compuestos en los que los poros son nanotubos de carbono encastrados en otro material que hace de matriz. Por el interior de los nanotubos de carbono pueden fluir tanto líquidos como gases y el tamaño nanométrico de su diámetro bloquea el paso de las partículas que se quiere eliminar. Muchos investigadores y empresas han desarrollado ya sistemas de filtración basados en nanotubos de carbono para agua (Pat: "Applied technology of carbon nanometer pipe for removing microencapsulated algae toxin in water" –Ecological Environment Research Center, Chinese Academy of Sciences).

Se pueden adicionar polímeros como el poliestireno, ácido metacrílico, y metil metacrilato sobre un material nanoporoso de carbono, compuesto de nanotubos de carbono, por medio de sus arreglos hexagonales que permitan la realización de una membrana; este diseño nos permite controlar el tamaño del poro y la selectividad química que se necesita para el tratamiento de agua. Es muy importante la selección del polímero que posea gran afinidad a la membrana, esto le confiere propiedades mecánicas muy atractivas para su uso.

Sin embargo hay diferentes dificultades pues en ocasiones no existen suficientes datos para comprobar los modelos diseñados además de que la experimentación con nanotecnología posee un alto costo. Sin embargo se pueden utilizar diversos materiales nanoporosos como matrices.

Uno de los principales problemas de los procesos de retirar la sal del agua marina es el costo. Los métodos que se aplican necesitan mucha energía y es lo que hace estos procedimientos caros. Sin embargo, se propone que las membranas más permeables de nanotubos podrían prescindir de los costos de energía para la desalinización, se pueden reducir hasta un 75%, dicha membrana es una nueva recopilación de materiales, donde las moléculas de carbono son organizadas para formar nanotubos. La superficie dentro de los nanotubos permite a los líquidos y gases pasar pero bloquea las moléculas más grandes, a continuación se aplica una matriz de material cerámico para adherir los tubos. Los tubos son muy pequeños y solamente seis moléculas de agua pueden pasar a través de su diámetro, sin embargo el flujo del agua es posible incrementarlo. En el año 2007, investigadores del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore desarrollaron una membrana de nanotubos en un chip de silicio, con características permeables mayores a la de las membranas usadas en osmosis inversa.

### ***Biomimética***

Las moléculas de agua pasan a través de canales hechos de acuaporinas, proteínas que conducen eficazmente el agua hacia adentro y afuera de las células vivas. Una carga positiva cerca del centro de cada canal repele la sal.

## **4.- ESTADO ACTUAL DE LA DESALACION**

### **4.1 SITUACIÓN MUNDIAL DE LA DESALACIÓN.**

Los procesos de desalinización se han extendido a 150 países y 300 millones de personas obtienen su agua del mar o de aguas salobres. Existen aproximadamente 14,450 plantas desalinizadoras y producen 60 millones m<sup>3</sup>/día, dos tercios de ellas en Oriente Medio. Dentro de los próximos seis años, las nuevas plantas de desalinización agregarán

capacidad hasta llegar a 109 millones de m<sup>3</sup>/día. Arabia Saudita es el país con la mayor cantidad de unidades con capacidad para producir agua por medio de este tipo de tecnologías correspondiendo al 25% del total, y proviene de unidades de desalación de agua de mar principalmente por medio de procesos de destilación. El segundo es Estados Unidos, con una capacidad total de aproximadamente 12%, utilizando la desalación de aguas subterráneas salobres a través del proceso de osmosis inversa.

Dos grandes proyectos en Estados Unidos vienen a marcar la pauta en lo que es el presente y el futuro de la tecnología de desalinización. Ambos proyectos se plantearon desde el crecimiento de la población, el descenso de las lluvias y el descenso de fuentes de acceso a agua. Tampa en Florida tiene desde enero de 2008, por ahora la mayor planta desaladora de Estados Unidos, con la cual se aporta al menos el 10% de las necesidades de agua potable de la región, con una capacidad de 108 mil metros cúbicos diarios. California tendrá la más grande planta desaladora de Estados Unidos y del Hemisferio Occidental, con la construcción de la planta desaladora en la ciudad de Carlsbad, al norte de San Diego. Esta producirá 204 mil metros cúbicos diarios. Los estadounidenses, sin embargo, actualmente sólo reciben un 1 por ciento de su agua con esta procedencia.

El país con más crecimiento en desalinización es Israel, que cuenta con las dos plantas de desalinización más grandes del mundo, Ashkelon y Hareda, con capacidad de 330 mil y 350 mil m<sup>3</sup> diarios respectivamente. Además está en construcción la planta de Sorek que deberá entrar en operación en 2012 con una capacidad de 410 mil m<sup>3</sup>/día. La desalinización significará más del 30% del abasto del agua para todos los usos en este país.

#### 4.2.- SITUACIÓN EN MÉXICO DE LA DESALACIÓN

Actualmente en México existen plantas desaladoras para aprovechar tanto agua de mar como aguas salobres continentales. Esta infraestructura se halla distribuida en todo el país, pero principalmente consiste en pequeñas plantas desaladoras con fines turísticos, municipales (limpieza) y generación de electricidad. También se consideraban desaladoras algunas plantas para obtención de yeso, cal y sal, pero donde se usaba evaporación natural sin recuperación del agua (principalmente en Baja California, Coahuila, Nuevo León, Estado de México y Distrito Federal).

A principios del siglo XXI se tenían 171 plantas desaladoras, de las cuales 30% no operaba de manera regular por problemas de mantenimiento, diseño o falta de capacitación en su uso. Del total en operación 53% eran para fines turísticos, con una capacidad instalada de 26,942 m<sup>3</sup>/d (311 L/s) y 12 % para uso industrial, equivalente a una capacidad instalada de 18,403 m<sup>3</sup>/d (211 L/s) para un total de 65 mil m<sup>3</sup>/día pero sólo 45 mil de capacidad neta en operación. Para 2007 se tenían en México 435 plantas desaladoras ubicadas en 320 sitios, con una capacidad instalada de 193,771 m<sup>3</sup>/d y si se estima el mismo porcentaje de operación se tendrían únicamente 136 mil m<sup>3</sup>/d de capacidad neta (Tabla 4). El estado con el mayor número de desaladoras es Quintana Roo, con 79 unidades; le sigue Baja California Sur, con 71.

**Tabla 3.** Distribución de desaladoras en México

	Sitios con plantas	Total plantas	En operación	Capacidad máxima instalada	% del total	Capacidad estimada en operación	% del total
				(m <sup>3</sup> /d)		(m <sup>3</sup> /d)	
Baja California	23	38	24	51,938	16.7	32,803	16.2
Baja California Sur	71	73	53	36,971	11.9	26,842	13.3
Campeche	8	19	14	5,456	1.8	4,020	2.0
Coahuila	31	33	23	7,768	2.5	5,344	2.6
Colima	17	18	2	2,856	0.9	317	0.2
Edo. de México	3	4	2	7,000	2.2	3,500	1.7
Distrito Federal	14	17	12	95,471	30.6	67,391	33.4
Durango	26	26	13	868	0.3	434	0.2
Guerrero	6	6	3	2,355	0.8	1,176	0.6
Jalisco	3	4	3	2,865	0.9	2,149	1.1
Morelos	2	21	21	110	0.0	110	0.1
Nuevo León	5	5	5	2,847	0.9	2,847	1.4
Oaxaca	1	4	4	14,526	4.7	14,526	7.2
Quintana Roo	79	124	73	53,339	17.1	31,401	15.5
San Luis Potosí	1	1	1	60	0.0	60	0.0
Sonora	16	22	15	9,349	3.0	6,374	3.2
Tamaulipas	4	4	2	5,100	1.6	2,550	1.3
Veracruz	9	15	11	12,167	3.9	8,922	4.4
Yucatán	1	1	1	700	0.2	700	0.3
<b>TOTAL NACIONAL</b>	<b>320</b>	<b>435</b>	<b>282</b>	<b>311,646</b>	<b>100</b>	<b>202,033</b>	<b>100</b>

En Baja California Sur, se cuenta con la planta municipal más grande del país, en los Cabos, que tiene una capacidad instalada de 200 L/s de agua potable (17,280 m<sup>3</sup>/d) y abastece a una parte de Cabo San Lucas, para fines urbanos y turísticos. Es una concesión por 20 años a una empresa española, y el costo por m<sup>3</sup> actualmente está alrededor de los diez pesos con cincuenta centavos. En febrero de 2010 se inauguró la segunda planta más grande, la de Litibú en Nayarit con una capacidad de 120 L/s; ambas plantas trabajan con ósmosis inversa. El crecimiento del número de desaladoras se está realizando principalmente en la península de Baja California. Por el contrario en Quintana Roo, se ha frenado la construcción de plantas desaladoras pues la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Quintana Roo en la Riviera Maya, negoció en 2007 con los hoteleros para que se conecten a la red de agua potable que construyeron; y los nuevos desarrollos están obligados a conectarse a dicha red de agua potable.

Otra de las plantas proyectadas es la planta desaladora de Ensenada, Baja California, en la que se estima una inversión del orden de 352 millones de pesos y una capacidad de algo mayor a la planta de Los Cabos (250 L/s) y contribuirá al abasto de agua potable de una población de 96 mil habitantes. Se espera inicie construcción a fin de 2010, pues para 2013 el problema de abasto en esta región se estima sea muy grave y debe ya estar en operación, aunque ha habido problemas políticos para aprobar la licitación de la obra. Así mismo se tienen los planes para instalar las plantas desaladoras de la Paz, Baja California Sur, Guaymas, Sonora y Rosarito, Baja California, para las cuales se están haciendo los estudios correspondientes.

Además de que muchas de la plantas, sobre todo pequeñas para fines turísticos o industriales ya construidas no están en operación, o funcionan de manera intermitente, ha habido dos grandes fracasos en la desalación en México, que son los proyectos de las plantas desaladoras para Hermosillo y para Puerto Peñasco, ambas en Sonora. En 2001, la

planta de Hermosillo se iba a comenzar a construir, pero por problemas políticos entre los gobiernos estatal y municipal se detuvo y hasta el momento no ha sido retomado. Esto a pesar de la severa condición de escasez de agua en esta zona y de que se tiene que traer de un acuífero lejano. Para la planta de Puerto Peñasco, en 2007 la Agencia de Desarrollo y Comercio de Estados Unidos aportó US\$ 369 000 para un estudio de factibilidad para su construcción. Todavía no inicia su construcción, que se planea arranque en 2012, como planta concesionada a una empresa estadounidense. Esta planta originalmente tendría una capacidad para 100 L/s. La planta de Hermosillo estaba planeada para una capacidad de 500 L/s. Se está estudiando que la planta de Peñasco abastezca también a Hermosillo y se pueda exportar agua desalada a Estados Unidos, con una capacidad de 4,000 L/s. En cuanto a otros desarrollos conjuntos entre México y otros países, existe la posibilidad de un proyecto entre las ciudades de San Diego y Tijuana, para construir una planta desaladora en el lado mexicano con dinero estadounidense; pero aún no se ha concretado.

## **5.- REQUERIMIENTOS PARA LA DESALACION**

### **5.1 REQUERIMIENTOS AMBIENTALES.**

Durante el proceso de desalinización, se van a obtener dos efluentes, uno de agua baja en sales, y otro con salmuera o concentrado de sales de estos procesos, la cual debe ser desechada adecuadamente, tratarse o secarse completamente para utilizar las sales. Por ejemplo si se tiene agua de mar, con concentración es de 35 000 mg/L de SDT, al desalarla en algunos procesos se puede obtener agua baja en sales -menor a 100 mg/L-, y rechazo o salmuera, con una concentración de 70,000 mg/L.

La producción de concentrados salinos como residuo por las plantas desaladoras es uno de sus mayores inconvenientes de la desalinización y aunque ésta es una de las soluciones al problema de la escasez de agua, está limitada por la generación de sal. Una de las desventajas más graves es la interrupción del ciclo natural de muchos organismos marinos por la extracción e introducción de nuevos contaminantes al ambiente

Los residuos se pueden secar por evaporación si existe área suficiente pero muchas veces la sal que queda se tiene que confinar o tratar, ya que tiene una composición o contaminantes que no permiten su utilización para consumo humano. El método de vertido de salmuera es más común, y se hace por medio de difusores ubicados mar adentro. El mar diluye rápidamente las altas concentraciones de sal vertidas. Es necesario no hacer estas descargas de salmuera en ambientes frágiles, como los arrecifes de coral.

Otra desventaja de la desalinización es el alto consumo de energía que presume el consumo directo o indirecto de combustibles fósiles para su obtención. Esto tiene obviamente efectos ambientales, sobre todo por la generación de gases de efecto invernadero. Sin embargo en los procesos donde el uso de energía se optimiza y se sustituye con fuentes renovables de energía como energía solar y eólica, los daños ambientales por consumo energético se disminuyen.

En México, el agua de mar a ser desalinizada es objeto de concesión. La solicitud de concesión debe de ir acompañada de una manifestación de impacto ambiental y debe contener: el volumen de extracción y los consumos requeridos, el proyecto de las obras a realizar para su extracción, aprovechamiento y descarga, incluyendo tratamiento de las aguas residuales y los procesos y medidas para el reuso del agua, y restauración del recurso hídrico; así como el costo económico y ambiental de las obras proyectadas. Actualmente está en estudio la norma oficial para la descarga de plantas desalinizadoras en el país, por lo que una vez fijada, será obligatorio su cumplimiento.

Finalmente se debe reflexionar que algunas plantas se han instalado o se piensan instalar en zonas cercanas a importantes áreas naturales y turísticas y por tanto se debe considerar una alternativa viable en tanto se consideren prevenibles sus consecuencias negativas al

ambiente. Las zonas costeras mexicanas que son parte de áreas nacionales protegidas son las siguientes: Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, Archipiélago Revillagigedo, Arrecife Alacranes, El Vizcaíno, Isla Contoy, Isla Isabel, Islas del Golfo de California, Isla Guadalupe, Isla Rasa, Isla Tiburón, Laguna de Términos, Laguna de Chacahua, Pantanos de Centla, Río Celestún, Río Lagartos, Sian Ka'an, Sistema Arrecifal Veracruzano, Tulum, Uaymil y Yum Balam.

## 5.2- REQUERIMIENTOS ECONOMICOS.

Los sistemas de desalinización están cambiando vertiginosamente; en tan sólo dos o tres años se han desarrollado y salido al mercado membranas resistentes al cloro, o con mayor remoción de boro.

Los costos disminuyen dramáticamente, en los sistemas tradicionales térmicos por destilación o evaporación el consumo de energía era 20 kW-h/m<sup>3</sup> hace 25 años y ha bajado a 8 kW-h/m<sup>3</sup> con los últimos procesos optimizando la energía. Y en los procesos por ósmosis inversa el consumo es de aproximadamente 3 kW-h/m<sup>3</sup> en agua de mar y en aguas salobres con consumos inferiores a 1 kW-h/m<sup>3</sup>, cuando hace diez años, se requerían 10-15 Kw/m<sup>3</sup>, y el m<sup>3</sup> tratado costaba entre 12 y 18 pesos. Ahora los equipos producen agua con hasta 2.8 Kw/m<sup>3</sup>, y el costo va de los seis a los ocho pesos por metro cúbico. Adicionalmente los costos del agua de fuentes convencionales tienden a incrementarse por la distancia de transferencia de caudal y por la profundidad de perforación de pozos que aumenta conforme se incrementa la demanda. También la sobreexplotación reduce la calidad de agua y necesita mayor inversión para ser acondicionada antes de inyectarla a las redes de distribución.

En octubre del 2003 la diferencia entre el costo del agua desalada y de fuentes naturales se consideraba de un 50%. Actualmente se estima en sólo un 35%. De los factores que determinan el costo de la desalación, el consumo de energía es el más importante y hacia el convergen otros factores primarios como la disponibilidad de un caudal seguro de agua de mar, libre de partículas en suspensión, la tecnología de desalación, la escala de producción y en combinación con estos la frecuencia de mantenimiento y la infraestructura. Es necesario considerar varios aspectos, entre los más importantes están: costos de inversión inicial, personal capacitado, eficiencia del equipo, costos de membranas, refacciones y servicio.

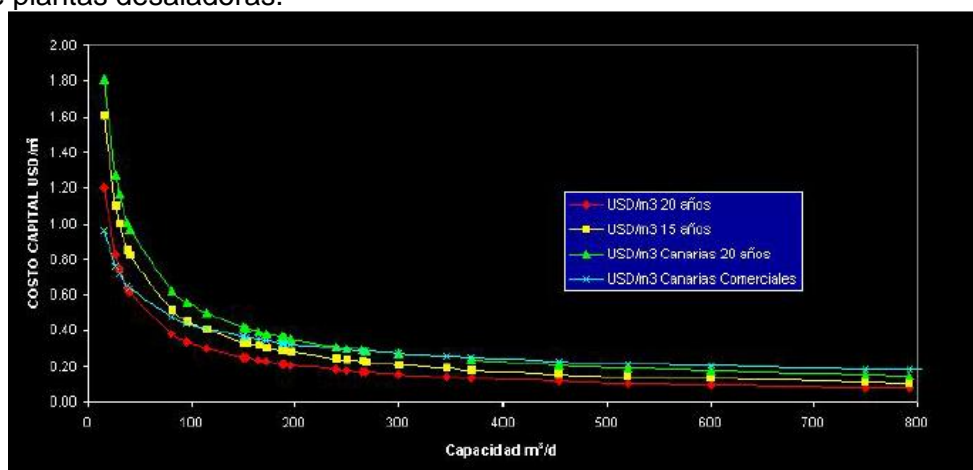
El proceso de Osmosis Inversa es en términos de consumo de energía el más eficiente y por lo mismo este proceso provee agua a un costo menor en comparación a los procesos de desalación por destilación. La ósmosis inversa es la opción más económica para desalar agua de mar y salobre, debido a las nuevas técnicas de ahorro de energía y al material de las membranas, obteniéndose costos hasta de \$0.32 USD/m<sup>3</sup>. Sobre todo para México la ósmosis inversa es el proceso más viable, a salvo claro de las nuevas tecnología, sobre todo considerando los procesos por destilación por quema de hidrocarburos como una fuente que se agotará en el futuro. Los costos de electricidad, operación, mantenimiento, aditivos y reposición de membranas y filtros de arena, para los procesos de ósmosis inversa van de \$0.15 a \$0.33 USD/m<sup>3</sup> en México. Para los procesos térmicos (MSF, MED, CV) van de \$0.11 a \$0.51 USD/m<sup>3</sup>.

La Tabla 5, muestra las ventajas y desventajas de las tecnologías comerciales, para desalar agua de mar.

**Tabla 4.-** Valoración de las diferentes alternativas comerciales de desalación

Característica / Proceso Desalinización	MSF	MED-TVC	CV	OI	ED
Tipo de Energía	Térmica	Térmica	Térmica	Presión	Eléctrica
Consumo energético primario (KJ/Kg)	Alto >200	Medio 150-200	Medio 100-150	Bajo <70	Bajo <30
Consumo de E. eléctrica (KW/h <sup>3</sup> )	3.5-4.0	1.5-2.0	9.0-11.0	2.0-4.5	1.0-2.0
Costo de instalaciones	Alto	Alto/medio	Alto	Medio	Medio
Capacidad producción (m <sup>3</sup> /d)	Alta >50,000	Media <20,000	Baja <5,000	Alta >50,000	Media <30,000
Posibilidad de ampliación modular	Difícil	Difícil	Difícil	Fácil	Fácil
Desalación agua salobre	Sí, pero caro	Sí, pero caro	Sí, pero caro	Si, económico	Si, económico
Desalación agua mar	Si	Si	Si	Si	No
Calidad de agua salada (ppm)	Alta <50	Alta <51	Alta <52	Media 100-500	Medio <200
Superficie requerida	Media	Media <20,000	Poca	Poca	Poca
Costo (US\$/m <sup>3</sup> ) gran capacidad	1.1-2.0 (variable)	0.8-1.5(variable)	0.6-1.2(variable)	0.25-0.6 (bajo)	0.15-0.35
Costo (US\$/m <sup>3</sup> ) planta pequeña	no viable	1.25-2.6	no viable	1.1-2.0	no estimado

Con base en la información de 2006, se calcularon los costos de inversión para las plantas de osmosis inversa de acuerdo al volumen a tratar en México. La Figura 8 muestra las líneas de tendencia, considerando periodos de amortización de 15 y 20 años y se realizó una comparación con un modelo desarrollado por una empresa española que se dedica a la venta de plantas desaladoras.

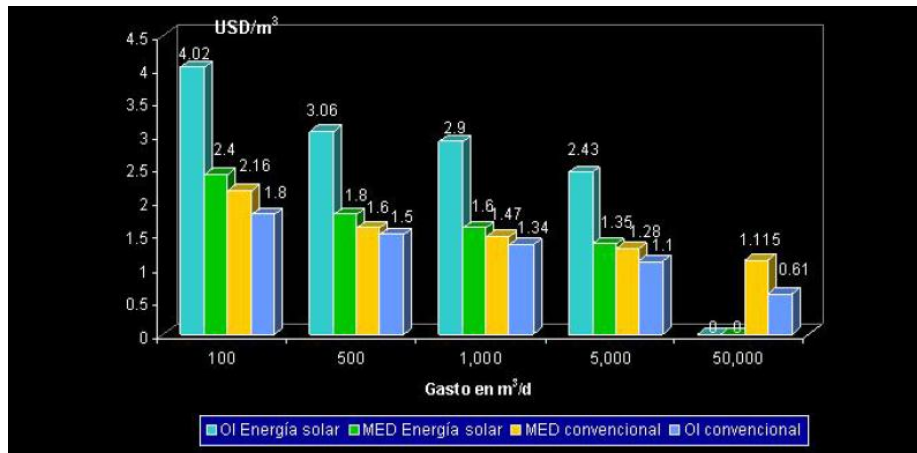


**Figura 8.-** Costo de inversión de las plantas desaladoras de ósmosis inversa en México

La curva muestra que a partir de un gasto de 450 m<sup>3</sup> /día el costo de capital se mantiene casi constante. Como referencia de costos actuales, la planta de Ensenada próxima a iniciar su construcción (a fines de 2010) es una planta de 250 L/s de capacidad y se estima una inversión cercana a 35 millones de dólares.

En el caso de los sistemas de desalación usando exclusivamente energías no convencionales, para el caso de México, son todavía costosos e incluso los acoplados a los sistemas convencionales de desalación. Por ejemplo los rendimientos de la destilación solar están alrededor de 10 litros por metros cuadrados (L/m<sup>2</sup>) de destilador solar, por lo que estos sistemas se recomiendan únicamente para comunidades pequeñas o inclusive familiares.

La Figura 9 muestra la comparación de costos de inversión para plantas desaladoras que utilizan energía no convencional contra las que utilizan diesel, electricidad u otro combustible.



**Figura 9.-** Costo de inversión de las plantas desaladoras de ósmosis inversa en México

Se observa que los costos para los procesos de desalación térmicos (MED, MSF) son muy similares entre los procesos convencionales y los que utilizan energías alternativas como la solar o la eólica, esto no es el caso para los procesos de ósmosis inversa, donde la diferencia de costos de inversión entre una y otra es grande.

Las consideraciones principales antes de decidir instalar una desaladora son las siguientes: alto costo de inversión inicial, requiere de personal capacitado, llevar a cabo un análisis económico (en el caso de abastecer un municipio, con el fin de conocer si el costo de inversión de una desaladora es menor que traer el agua potable de distancias lejanas o perforando pozos), condicionantes ambientales y sociales.

El sistema de ósmosis inversa es la opción más económica para desalar agua salobre y de mar, los costos de inversión de estos procesos para agua de mar van de \$0.32 a \$0.61 USD/m<sup>3</sup> para plantas que producen en promedio más de 10,000 m<sup>3</sup>/d y de \$0.41 a \$0.43 USD/m<sup>3</sup> para plantas que producen menos de 5,000 m<sup>3</sup>/d. Para agua salobre el costo de inversión se reduce de \$0.146 a \$0.30 USD/m<sup>3</sup>, esto se debe a que los costos de membrana se reducen respecto a las utilizadas para agua de mar.

Al seleccionar un sistema de ósmosis inversa, es importante considerar los siguientes puntos:

- a) Haber agotado todas las alternativas posibles de abastecimiento
- b) Selección de la mejor tecnología
- c) Selección de la obra de toma de agua
- d) Calidad requerida del agua
- e) Uso de químicos
- f) Aspectos ambientales
- g) Operación y mantenimiento
- h) Costos
- i) Fuentes de financiamiento
- j) Capacitación del personal
- k) Servicio técnico adecuado
- l) Sistemas de ahorro de energía

Los equipos con sistemas de ahorro de energía son más eficientes y gastan alrededor de 2.4 kW-h/m<sup>3</sup>, lo anterior se reflejará en ahorros significativos en el consumo de energía. Hay que considerar los gastos de operación, reactivos, cambios de membranas y filtros, que dependiendo del tipo de agua pueden impactar los costos finales. Estos son en promedio de \$0.15 a \$0.33 US\$/m<sup>3</sup> para ósmosis inversa y de \$0.11 a \$0.51 US\$/m<sup>3</sup> para procesos térmicos. En el futuro los costos por fuentes alternativas de energía y las nuevas tecnologías de separación, harán todavía más económicos y eficientes los procesos de desalinización.



## **APENDICE 2: MODIFICACION A LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, SALUD AMBIENTAL. AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION.**

### 0. Introducción

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características microbiológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor. Por tales razones la Secretaría de Salud, propone la modificación a la presente Norma Oficial Mexicana, con la finalidad de establecer un eficaz control sanitario del agua que se somete a tratamientos de potabilización a efecto de hacerla apta para uso y consumo humano, acorde a las necesidades actuales.

### 1. Objetivo y campo de aplicación

1.1 Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano.

1.2 Esta Norma Oficial Mexicana es aplicable a todos los sistemas de abastecimiento públicos y privados y a cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

### 2. Referencias

2.1 NOM-008-SCF1-1993 Sistema General de Unidades de Medida.

2.2 NOM-012-SSA1-1993 Requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano públicos y privados.

2.3 NOM-013-SSA1-1993 Requisitos sanitarios que debe cumplir la cisterna de un vehículo para el transporte y distribución de agua para uso y consumo.

2.4 NOM-014-SSA1-1993 Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano, en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados.

2.5 NOM-112-SSA1-1994 Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable.

2.6 NOM-117-SSA1-1994 Bienes y Servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, hierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica.

### 3. Definiciones

Para los efectos de esta Norma Oficial Mexicana se entiende por:

3.1 Ablandamiento, proceso de remoción de los iones calcio y magnesio, principales causantes de la dureza del agua.

3.2 Adsorción, remoción de iones y moléculas de una solución que presentan afinidad a un medio sólido adecuado, de forma tal que son separadas de la solución.

3.3 Agua para uso y consumo humano, agua que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos para la salud. También se denomina como agua potable.

3.4 Características microbiológicas, debidas a microorganismos nocivos a la salud humana. Para efectos de control sanitario se determina el contenido de indicadores generales de contaminación microbiológica, específicamente organismos coliformes totales y *Escherichia coli* o coliformes fecales.

3.5 Características físicas y organolépticas, las que se detectan sensorialmente. Para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos y el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio.

3.6 Características químicas, las debidas a elementos o compuestos químicos, que como resultado de investigación científica se ha comprobado que pueden causar efectos nocivos a la salud humana.

3.7 Características radiactivas, aquellas resultantes de la presencia de elementos radiactivos.

3.8 Coagulación química, adición de compuestos químicos al agua, para alterar el estado físico de los sólidos disueltos, coloidales o suspendidos, a fin de facilitar su remoción por precipitación o filtración.

3.9 Contingencia, situación de cambio imprevisto en las características del agua por contaminación externa, que ponga en riesgo la salud humana.

3.10 Desinfección, destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos.

3.11 Evaporación, separación del agua de los sólidos disueltos, utilizando calor como agente de separación, condensando finalmente el agua para su aprovechamiento.

3.12 Filtración, remoción de partículas suspendidas en el agua, haciéndola fluir a través de un medio filtrante de porosidad adecuada.

3.13 Floculación, aglomeración de partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación química, a través de medios mecánicos o hidráulicos. 3.14 Intercambio iónico, proceso de remoción de aniones o cationes específicos disueltos en el agua, a través de su reemplazo por aniones o cationes provenientes de un medio de intercambio, natural o sintético, con el que se pone en contacto.

3.15 Límite permisible, concentración o contenido máximo o intervalo de valores de un componente, que no causará efectos nocivos a la salud del consumidor.

3.16 Neutralización, adición de sustancias básicas o ácidas al agua para obtener un pH neutro.

3.16.1 Estabilización, obtención de determinada concentración de sales y pH del agua, para evitar la incrustación o corrosión de los materiales con que se fabrican los elementos que la conducen o contienen.

3.17 Osmosis inversa, proceso esencialmente físico para remoción de iones y moléculas disueltos en el agua, en el cual por medio de altas presiones se fuerza el paso de ella a través de una membrana semipermeable de porosidad específica, reteniéndose en dicha membrana los iones y moléculas de mayor tamaño.

3.18 Oxidación, pérdida de electrones de un elemento, ion o compuesto por la acción del oxígeno u otro agente oxidante.

3.19 Potabilización, conjunto de operaciones y procesos, físicos y/o químicos que se aplican al agua en los sistemas de abastecimiento públicos o privados, a fin de hacerla apta para uso y consumo humano.

3.20 Sedimentación, proceso físico que consiste en la separación de las partículas suspendidas en el agua, por efecto gravitacional.

3.21 Sistema de abastecimiento de agua, conjunto de elementos integrados por las obras hidráulicas de captación, conducción, potabilización, desinfección, almacenamiento o regulación y distribución.

#### 4. Límites permisibles de calidad del agua

##### 4.1 Límites permisibles de características microbiológicas.

4.1.1 El contenido de organismos resultante del examen de una muestra simple de agua, debe ajustarse a lo establecido en la Tabla 1.

TABLA 1

##### CARACTERISTICA LIMITE PERMISIBLE

Organismos coliformes totales	Ausencia o no detectables
E. coli o coliformes fecales u organismos termotolerantes	Ausencia o no detectables

4.1.2 Bajo situaciones de emergencia, las autoridades competentes podrán establecer los agentes

biológicos nocivos a la salud que se deban investigar.

4.1.3 Las unidades de medida deberán reportarse de acuerdo a la metodología empleada.

4.1.4 El agua abastecida por el sistema de distribución no debe contener E. coli o coliformes fecales u organismos termotolerantes en ninguna muestra de 100 ml. Los organismos coliformes totales no deben ser detectables en ninguna muestra de 100 ml; en sistemas de abastecimiento de localidades con una población mayor de 50,000 habitantes; estos organismos deberán estar ausentes en el 95% de las muestras tomadas en un mismo sitio de la red de distribución, durante un periodo de doce meses de un mismo año.

##### 4.2 Límites permisibles de características físicas y organolépticas.

4.2.1 Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 2.

TABLA 2

##### CARACTERISTICA LIMITE 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 resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

##### 4.3 Límites permisibles de características químicas.

4.3.1 El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 3. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

TABLA 3  
LIMITE PERMISIBLE

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Aluminio	0,20
Arsénico (Nota 2)	0,05
Bario	0,70
Cadmio	0,005
Cianuros (como CN- )	0,07
Cloro residual libre	0,2-1,50
Cloruros (como Cl-)	250,00
Cobre	2,00
Cromo total	0,05
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500,00
Fenoles o compuestos fenólicos	0,3
Fierro	0,30
Fluoruros (como F-)	1,50
Hidrocarburos aromáticos en microgramos/l:	
Benceno	10,00
Etilbencen	300,00
Tolueno	700,00
Xileno (tres isómeros)	500,00
Manganeso	0,15
Mercurio	0,001
Nitratos (como N)	10,00
Nitritos (como N)	1,00
Nitrógeno amoniacal (como N)	0,50
pH (potencial de hidrógeno)	
en unidades de pH	6,5-8,5
Plaguicidas en microgramos/l:	
Aldrín y dieldrín	
(separados o combinados)	0,03
Clordano (total de isómeros)	0,20
DDT (total de isómeros)	1,00
Gamma-HCH (lindano)	2,00
Hexaclorobenceno	1,00
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0,03
Metoxicloro	20,00
2,4 – D	30,00
Plomo	0,01
Sodio	200,00
Sólidos disueltos totales	1000,00
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> = )	400,00
Sustancias activas al azul de metileno	
(SAAM)	0,50
Trihalometanos totales	0,20
Yodo residual libre	0,2-0,5
Zinc	5,00

Nota 1. Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

Nota 2. El límite permisible para arsénico se ajustará anualmente, de conformidad con la siguiente tabla de cumplimiento gradual:

TABLA DE CUMPLIMIENTO GRADUAL

Límite permisible mg/l	Año
0,045	2001
0,040	2002
0,035	2003
0,030	2004
0,025	2005

4.3.2 En caso de que en el sistema de abastecimiento se utilicen para la desinfección del agua, métodos que no incluyan cloro o sus derivados, la autoridad sanitaria determinará los casos en que adicionalmente deberá dosificarse cloro al agua distribuida, para mantener la concentración de cloro residual libre dentro del límite permisible establecido en la Tabla 3 de esta Norma.

4.4 Límites permisibles de características radiactivas.

El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 4. Los límites se expresan en Bq/l (Becquerel por litro).

CARACTERISTICA	TABLA 4
	LIMITE PERMISIBLE Bq/l
Radiactividad alfa global	0,56
Radiactividad beta global	1,85

## 5. Tratamientos para la potabilización del agua

La potabilización del agua proveniente de una fuente en particular, debe justificarse con estudios de calidad y pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para asegurar su efectividad.

Se deben aplicar los tratamientos específicos siguientes o los que resulten de las pruebas de tratabilidad, cuando los contaminantes microbiológicos, las características físicas y los constituyentes químicos del agua listados a continuación, excedan los límites permisibles establecidos en el apartado 4 de esta Norma.

### 5.1 Contaminación microbiológica.

5.1.1 Bacterias, helmintos, protozoarios y virus. Deben desinfectarse con cloro, compuestos de cloro, yodo<sup>1</sup>, ozono, luz ultravioleta; plata iónica o coloidal; coagulación-sedimentación-filtración; filtración en múltiples etapas.

<sup>1</sup> El cumplimiento del límite permisible de yodo residual libre, es de observancia obligatoria para los responsables de los sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados, en los que se utilice yodo como método de desinfección. La aplicación de yodo como alternativa de desinfección, deberá ser aprobada por la autoridad sanitaria correspondiente.

## 5.2 Características físicas y organolépticas.

5.2.1 Color, olor, sabor y turbiedad.- Oxidación-coagulación-floculación-sedimentación-filtración; adsorción en carbón activado.

## 5.3 Constituyentes químicos.

5.3.1 Arsénico. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración; intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.2 Aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total y plomo. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración; intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.3 Cloruros. Intercambio iónico, ósmosis inversa o evaporación.

5.3.4 Dureza. Ablandamiento químico o intercambio iónico.

5.3.5 Fenoles o compuestos fenólicos. Oxidación-coagulación-floculación-sedimentación-filtración; adsorción en carbón activado u oxidación con ozono.

5.3.6 Hierro y/o manganeso. Oxidación-filtración, intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.7 Fluoruros. Alúmina activada, carbón de hueso u ósmosis inversa.

5.3.8 Hidrocarburos aromáticos. Oxidación-filtración o adsorción en carbón activado.

5.3.9 Mercurio. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración; adsorción en carbón activado granular u ósmosis inversa cuando la fuente de abastecimiento contenga hasta 10 microgramos/l. Adsorción en carbón activado en polvo cuando la fuente de abastecimiento contenga más de 10 microgramos/l.

5.3.10 Nitratos y nitritos. Intercambio iónico o coagulación-floculación-sedimentación-filtración.

5.3.11 Nitrógeno amoniacal. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración, desgasificación o desorción en columna.

5.3.12 pH (potencial de hidrógeno). Neutralización.

5.3.13 Plaguicidas. Adsorción en carbón activado granular.

5.3.14 Sodio. Intercambio iónico.

5.3.15 Sólidos disueltos totales. Coagulación-floculación-sedimentación-filtración y/o intercambio iónico.

5.3.16 Sulfatos. Intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.17 Sustancias activas al azul de metileno. Adsorción en carbón activado.

5.3.18 Trihalometanos. Oxidación con aireación u ozono y adsorción en carbón activado granular.

5.3.19 Zinc. Evaporación o intercambio iónico.

5.4 En el caso de contingencia, resultado de la presencia de sustancias especificadas o no especificadas en el apartado 4, las autoridades locales, la Comisión Nacional del Agua, los responsables del abastecimiento y los particulares, instituciones públicas o empresas privadas, involucrados en la contingencia, deben coordinarse con la autoridad sanitaria competente, para determinar las acciones que se deben realizar con relación al abastecimiento de agua a la población.

## 6. Métodos de prueba

La selección de los métodos de prueba para la determinación de los parámetros definidos en esta Norma, es responsabilidad de los organismos operadores de los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano, y serán aprobados por la Secretaría de Salud a través del área correspondiente. Deben

establecerse en un Programa de Control de Calidad Analítica del Agua, y estar a disposición de la autoridad competente, cuando ésta lo solicite, para su evaluación correspondiente.

#### 7. Concordancia con normas internacionales y nacionales

Esta Norma Oficial Mexicana no es equivalente a ninguna norma internacional.

#### 8. Bibliografía

8.1 Directrices Canadienses para la Calidad del Agua Potable. 6ta. edición. Ministerio de Salud. 1996.

8.2 Desinfección del Agua. Oscar Cáceres López. Lima, Perú. Ministerio de Salud. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1990.

8.3 Guías para la Calidad del Agua Potable. Volumen 1. Recomendaciones. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1985.

8.4 Guías para la Calidad del Agua Potable. Volumen 1. Recomendaciones. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1995.

8.5 Guías para la Calidad del Agua Potable. Volumen 2. Criterios relativos a la salud y otra información de base. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1987.

8.6 Guía para la Redacción, Estructuración y Presentación de las Normas Oficiales Mexicanas. Proyecto de Revisión. SECOFI. 1992.

8.7 Guías para la selección y aplicación de tecnologías de desinfección del agua para consumo humano en pueblos pequeños y comunidades rurales en América Latina y el Caribe. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1995.

8.8 Guide to Selection of Water Treatment Processes. Carl L. Hamann Jr., P.E. J. Brock Mc. Ewen, P.E. Anthony G. Meyers, P.E.

8.9 Ingeniería Ambiental. Revista No. 23. Año 7. 1994.

8.10 Ingeniería Sanitaria Aplicada a la Salud Pública. Francisco Unda Opazo. UTEHA 1969.

8.11 Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales. Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. Gordon M. Fair, John C. Geyer, Daniel A. Okun. Limusa Wiley. 1971.

8.12 Instructivo para la Vigilancia y Certificación de la Calidad Sanitaria del Agua para Consumo Humano. Comisión Interna de Salud Ambiental y Ocupacional. Secretaría de Salud 1987.

8.13 Importancia para la Salud Pública de los Indicadores Bacterianos que se Encuentran en el Agua Potable. Martin J. Allen. Organización Panamericana de la Salud. OMS. Lima Perú, 1996.

8.14 Integrated Design of Water Treatment Facilities. Susumu Kawamura. John Willey and Sons, Inc. 1991.

8.15 Manual de Normas de Calidad para Agua Potable. Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. 1982.

8.16 Manual de Normas Técnicas para el Proyecto de Plantas Potabilizadoras. Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. 1979.

8.17 Manual de Técnicas Analíticas del Laboratorio Nacional de Salud Pública. Secretaría de Salud.

8.18 Método de Tecnología de Substrato Definida para el Conteo Simultáneo Rápido y Específico de los Coliformes Totales y la *Escherichia coli* del agua. Stephen C. Edberg, Martin J. Allen & Darrell B. Smith. Journal Association Official Analytical Chemists (Vol. 74 No. 3, 1991).

8.19 Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM- -SSA1- 1996 Vigilancia y evaluación del control de la calidad del agua para uso y consumo humano, distribuidas por sistemas de abastecimiento público.

8.20 Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios. Diario Oficial de la Federación. 18 de enero de 1988.

8.21 Regulaciones Nacionales Primarias del Agua Potable, Técnicas Analíticas: bacteria coliforme. Agencia de Protección Ambiental (USA). 1992.

8.22 Revision of the WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. IPS. International Programme on Chemical Safety. United Nations Environment Programme. International Labour Organization. World Health Organization. 1991.

8.23 WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 1. Recommendations. World Health Organization. 1992.

8.24 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th. Edition. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 1995.

8.25 WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 2. Health Criteria and Other Supporting Information. Chapter 1: Microbiological Aspects. United Nations Environment Programme. International Labour Organization. World Health Organization. 1992.

## 9. Observancia de la Norma

La vigilancia del cumplimiento de esta Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Salud en coordinación con los gobiernos estatales, municipales, el Gobierno del Distrito Federal, las Comisiones Estatales de Agua y Saneamiento y la Comisión Nacional del Agua, en sus respectivos ámbitos de competencia.

## 10. Vigencia

La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor a los noventa días de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

Sufragio Efectivo. No Reelección.

México, D.F., a 20 de octubre de 2000.- El Presidente del Comité Consultivo  
Nacional de Normalización de  
Regulación y Fomento Sanitario, Javier Castellanos Coutiño.- Rúbrica.



## **APENDICE 3: NMX-AA-120-SCFI-2006 QUE ESTABLECE LOS REQUISITOS Y ESPECIFICACIONES DE SUSTENTABILIDAD DE CALIDAD DE PLAYAS**

### **INTRODUCCIÓN**

Esta norma mexicana incluye medidas ambientales para la protección al ambiente, en las playas turísticas de México, en materia de calidad de agua, residuos sólidos, infraestructura costera, biodiversidad, seguridad y servicios, educación ambiental y contaminación por ruido.

La aplicación de los requisitos que establece el presente proyecto de Norma comprende las dos modalidades de playa:

- 1) Para uso recreativo.
- 2) Prioritaria para la conservación.

Los ecosistemas costeros no sólo abarcan un amplia gama de tipos de hábitat y una enorme riqueza de especies, sino que, además, albergan nutrientes y, en su ciclo, filtran contaminantes provenientes de los sistemas continentales de agua dulce, y ayudan a proteger la línea costera de la erosión y las tormentas. Contiguo a la línea costera está el océano, que cumple un papel fundamental en la regulación hidrológica y el clima, además de constituir una importante fuente de carbono y oxígeno por su alta productividad de fitoplancton. Por todo esto, el uso, manejo y conservación de los ecosistemas costeros juegan un papel primordial en la estrategia de desarrollo de un país.

Mundialmente se reconoce que una zona costera con playa contribuye de manera importante al desarrollo del potencial turístico de una región, por lo que la incidencia de las diversas actividades humanas en la calidad de las aguas marinas se manifiesta como prioritaria para muchos países.

La certificación otorga beneficios potenciales para la sociedad, el medio ambiente y para los gobiernos, estos sistemas ofrecen una opción eficaz a la reglamentación directa.

### **OBJETIVO**

Esta norma mexicana establece los requisitos y especificaciones de sustentabilidad para playas en las siguientes modalidades:

- 1) Uso recreativo.
- 2) Prioritaria para la conservación.

En el caso de playas prioritarias para la conservación las medidas de esta norma no podrán contravenir lo dispuesto en los Programas de Conservación y Manejo, los Ordenamientos Ecológicos del Territorio locales, regionales y marinos, y cualquier otro ordenamiento jurídico aplicable

### **CAMPO DE APLICACIÓN**

Esta norma mexicana aplica a los Municipios, Comités Locales de Playas Limpias, y las personas físicas y morales interesadas en la evaluación de la calidad de playas conforme a la presente norma, en todo el territorio nacional.

## DEFINICIONES

Para efectos de esta norma mexicana se establecen las definiciones siguientes:

### 3.1 Certificado

Documento que emite la persona acreditada, de conformidad con la presente norma mexicana.

### 3.2 Dictamen

Documento que emite la persona acreditada como resultado de la evaluación de la conformidad de la presente norma mexicana.

### 3.3 Dunas

Son grandes acumulaciones de arena, las cuales son depositadas por el oleaje, y con la ayuda del viento son desplazadas hacia la playa, a lo largo del litoral. Generalmente, tienen forma de cordones de arena paralelos entre sí.

### 3.4 Ejemplares o poblaciones exóticas

Aquellos que se encuentran fuera de su ámbito de distribución natural, lo que incluye a los híbridos y modificados.

### 3.5 Humedales costeros

Ecosistemas costeros de transición entre aguas continentales y marinas, cuya vegetación se caracteriza por ser halófila, estacional o permanente, y que dependen de la circulación continua del agua salobre y marina. Asimismo, se incluyen las regiones marinas de no más de 6 metros de profundidad con relación al nivel medio de la marea más baja.

### 3.6 Laboratorio de prueba

Aquellos laboratorios de prueba acreditados por la Entidad Mexicana de Acreditación y/o los laboratorios aprobados por la Secretaría de Salud.

### 3.7 Interesado

Los Municipios, Comités Locales de Playas Limpias, y las personas físicas y morales que soliciten ante una persona acreditada y aprobada, la evaluación de la conformidad de la presente norma mexicana.

### 3.8 Playa

Unidad geomorfológica conformada por la acumulación de sedimentos no consolidados de distintos tipos y cuyos límites se establecerán, considerando límite inferior y límite superior.

- Límite inferior: Se establecerá a una distancia de 200 m medidos a partir del límite hacia el mar de la zona federal marítimo terrestre. En caso de no existir dicho límite, la medición se considerará perpendicularmente desde la proyección vertical de la línea de pleamar hacia el mar.
- Límite superior: Se establecerá por la presencia de algún tipo de construcciones cimentadas, presencia de vegetación permanente, presencia del segundo cordón de dunas ó presencia de cantiles costeros.

### 3.9 Playas prioritarias para la conservación

Aquellas playas recreativas que se encuentran ubicadas dentro de los límites territoriales de las reas naturales protegidas municipales, estatales y federales y las Regiones Prioritarias Marinas, Terrestres, Hidrológicas y Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICAS) establecidas por la CONABIO, así como aquellas inscritas en la Convención de Humedales de Importancia Internacional (RAMSAR) y las que así se definan en los Programas Maestros de Control de la Zona Federal Marítimo Terrestre, o los que así se definan en los Ordenamientos Ecológicos del territorio locales, regionales y marinos.

### 3.10 Playas de uso recreativo

Aquellas donde se realizan actividades de esparcimiento.

### 3.11 Persona acreditada

Los organismos de certificación, laboratorios de prueba, laboratorios de calibración y unidades de verificación reconocidos por una entidad de acreditación para la evaluación de la conformidad.

### 3.12 Residuos Peligrosos

Aquellos listados en la NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características y procedimientos de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

### 3.13 Residuo Riesgoso

Residuos sólidos que pueden herir, lastimar o dañar al hombre o a la flora y fauna. Para efectos de esta norma serán considerados como tales: pedacería de vidrio, fierro, latas mal abiertas, alambre, clavos, recipientes metálicos, y objetos punzo cortantes, entre otros.

### 3.14 Residuos Sólidos

Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques: Los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por la Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos como residuos de otra índole.

### 3.15 SECRETARÍA

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

### 3.16 Zona terrestre adyacente

Tendrá un ancho no menor de 800 m hacia tierra medidos perpendicularmente desde la proyección vertical del límite superior de la zona federal marítimo terrestre. En caso de no existir dicho límite, la medición se considerará perpendicularmente desde la proyección vertical de la línea de pleamar máxima hacia tierra.

## REQUISITOS GENERALES

- 4.1 El interesado especificará la delimitación geográfica de la playa, acompañando lo siguiente:

- 4.1.1 Croquis del territorio estatal en donde se indique el sitio donde se ubica la playa.
  - 4.1.2 Croquis de la Región Hidrológica haciendo referencia a las entidades federativas que abarca, en donde se ubica el sitio de la playa.
  - 4.1.3 Plano a escala 1:1 000, donde se localice el área de playa que desea certificar, con la ubicación municipal en el cual deben señalarse los sitios para el muestreo de las aguas, los cuales deben estar georeferenciados y deben ser fijos.
  - 4.1.4 Plano a escala 1:1 000, donde se detalle la infraestructura de servicios existente, localizando los servicios sanitarios, regaderas, contenedores para la recolección de residuos, salvavidas, servicios de emergencia, entre otros.
- 4.2 En el caso de playas con una longitud menor a 500 m, deben considerarse en su totalidad y no podrán fragmentarse. En caso de que la longitud de la playa sea mayor a 500 m, podrá solicitar la certificación de un segmento considerando como mínimo una longitud de 500 m.
- 4.3 Las medidas de esta norma no podrán contravenir lo dispuesto en los Programas de Conservación y Manejo, los Ordenamientos Ecológicos del Territorio locales, regionales y marinos, y cualquier otro ordenamiento jurídico aplicable.

## REQUISITOS PARTICULARES

Para el caso de playas para uso recreativo se debe cumplir con lo siguiente:

- 5.1 De calidad de agua de mar, lagunas costeras y estuarios.
  - 5.1.a Las playas se clasifican de acuerdo a la calidad bacteriológica del agua, misma que deberá ubicarse dentro del límite de 100 Enterococos NMP/100 ml. La selección de los sitios de muestreo se hará tomando como criterios las características físicas, geográficas e hidrológicas, tamaño y zona de afluencia de turistas, contando como mínimo con tres estaciones de muestreo en los límites y centro de playa.
  - 5.1.b El procedimiento de muestreo, preservación de las muestras, almacenamiento y análisis se realizará conforme a lo establecido a los apéndices normativos I y II.
  - 5.1.c La frecuencia de los muestreos debe realizarse semanalmente y contar con los resultados de 3 meses anteriores a la evaluación.
  - 5.1.d No debe existir película visible de grasas, aceites o residuos derivados del petróleo sobre la superficie del agua.
  - 5.1.e No debe existir presencia de espumas diferentes a las producidas por el oleaje sobre la superficie del agua.
  - 5.1.f No debe haber residuos sólidos flotantes en la superficie del agua, ni residuos en el fondo a una profundidad visible.
  - 5.1.g En el caso de que la playa y/o la zona terrestre adyacente de playa de la misma sirva de cuerpo receptor de descargas de aguas residuales, se debe cumplir con los parámetros establecidos en la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, para lo cual se deben identificar los puntos de descarga y señalar el tipo de tratamiento.
- 5.2 De residuos sólidos
  - 5.2.a No debe existir materia fecal (con base a la metodología del apéndice normativo III).

5.2.b El límite máximo permisible de residuos sólidos en superficie en la playa será máximo de 5 unidades por cada transecto de 100 m., las cuales no deben rebasar los 5 kg. De peso, ó 0,5 m3 de volumen. Los transectos son paralelos a la línea de marea reciente hasta el límite de la playa, de conformidad con la metodología que establece el apéndice normativo III.

5.2.c No deben existir residuos peligrosos en la playa.

5.2.d En la playa no habrá presencia de ningún tipo de residuo considerado como riesgoso de conformidad con la definición de la presente norma.

5.2.e No deben existir manchas evidentes de grasas, aceites y residuos derivados del petróleo en la arena.

5.2.f El interesado debe contar con un Programa para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos que contemple desde la minimización de la generación, separación, acopio, recolección y, en su caso, reuso y reciclaje. En caso de que el interesado sea el Municipio deberá cumplir con lo dispuesto en los artículos 5 fracción X y 10 de la Ley General para la Prevención y Gestión

Integral de los Residuos Sólidos.

5.2.g Deben existir botes de almacenamiento temporal de residuos sólidos en proporción a la afluencia de usuarios de la playa, tomando las medidas de seguridad necesarias, evitando la proximidad de los botes de almacenamiento temporal con el mar.

5.2.h Los botes de almacenamiento temporal de residuos sólidos deben contar con tapa, y no deben tener contacto con el suelo.

5.2.i Los establecimientos que prestan servicios en la playa deben tener a disposición del público tres botes de almacenamiento temporal de residuos sólidos separados, con letrero explicativo, y en lugar visible para residuos orgánicos, material reciclable y otros. Se debe incluir un listado de los

residuos considerados reciclables en la localidad en el letrero del bote de almacenamiento temporal del material reciclable.

5.2.j Los responsables deben considerar una frecuencia del servicio de limpia, como mínimo una vez al día.

5.2.k Se debe contar con un programa de recolección de residuos sólidos en los cauces fluviales que se ubiquen dentro de la zona terrestre adyacente.

5.2.l En caso de que en la zona terrestre adyacente existan humedales costeros no debe haber presencia de residuos sólidos.

5.2.m Ante la presencia de fuentes puntuales de contaminación que se generen en la zona terrestre adyacente se debe identificar la ubicación y tipo de contaminante.

### 5.3 De Infraestructura costera

5.3.a No debe existir infraestructura cimentada en el área intermareal, excepto instalaciones portuarias que cuenten con la autorización de impacto ambiental.

5.3.b El establecimiento de infraestructura en playa, debe ser únicamente de bajo impacto como enramadas, sombrillas y palafitos, que permitan el transporte de sedimentos, así como las instalaciones de seguridad a las que se refiere la presente norma.

5.3.c La infraestructura no debe interrumpir el flujo de circulación del agua en humedales costeros que se encuentren dentro de la zona terrestre adyacente.

5.3.d No debe existir infraestructura en las dunas costeras.

### 5.4 De biodiversidad

5.4.a Los interesados deberán incluir una descripción general de especies de flora y fauna terrestres y acuáticas de importancia en la zona.

5.4.b En caso de contar con la presencia de especies listadas en la NOM-059-SEMARNAT-2001-Protección Ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestre-categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio lista de especies en riesgo, se debe contar con un plan que contenga las especificaciones mínimas siguientes:

5.4.b.1 Descripción general de la especie y su hábitat.

5.4.b.2 Acciones de protección para la flora y fauna silvestres, las cuales deben contener al menos:

a) Metas a corto, mediano y largo plazo. b) Mecanismos de vigilancia del plan.

5.4.c Sólo se permite la exhibición de especies de fauna silvestre en cautiverio cuando se cumpla con lo dispuesto en la Ley General de Vida Silvestre.

5.4.d En las playas con presencia de especies de fauna silvestre debe existir señalización visible con indicaciones a los visitantes, respecto a su protección y cuidado y se deberá evitar capturar, perseguir, molestar o dañar en cualquier forma a ejemplares de fauna silvestre.

5.4.e En el caso de presencia de vegetación sumergida se tomarán las medidas necesarias para su conservación, prohibiendo en todo caso la remoción de la vegetación.

5.4.f En caso de que la vegetación se encuentre depositada en la arena, será considerada como residuo orgánico en cuyo caso podrá ser removida, y no deberá ser considerado como residuo sólido en los términos del numeral 5.2.2.

5.4.g No debe removerse la vegetación nativa de la duna costera, y debe existir señalización en la playa acerca de las medidas que se realizan para su protección.

5.4.h Sólo se permitirá la ornamentación con especies de flora nativa de la región o especies compatibles que no afecten la composición de los ecosistemas del sitio y del entorno adyacente. Para tal efecto se consultará el Sistema Integral de Apoyo para la Reforestación. (SIRE).

5.4.i No se permitirá la introducción de especies exóticas de fauna.

5.4.j En el caso de que, en la playa exista la presencia de zonas de anidación de tortugas se deberán tomar las siguientes medidas de protección:

5.4.j.1 No deben existir estructuras rígidas en las playas de anidación que puedan afectar negativamente el hábitat de anidación, bloquear el acceso de hembras anidantes o crear trampas para las tortugas marinas y sus crías.

5.4.j.2 Se debe contar con vigilancia en la época de arribazón y anidación de las tortugas marinas.

5.4.j.3 Durante la época de anidación y avivamiento se debe eliminar cualquier fuente de iluminación dirigida hacia las playas de anidación.

5.5 De seguridad y servicios

5.5.a Las actividades terrestres que se desarrollen en las playas deberán estar zonificadas con el objeto de minimizar los impactos ambientales; así como delimitar con boyas y señalización el espacio de entrada y salida de los botes y demás servicios náutico - recreativos con el objeto de minimizar accidentes y otorgar seguridad a los usuarios.

5.5.b Se debe mantener por lo menos un acceso al público en aquellas playas que midan menos de 500 m, si la playa es mayor a 500 m deberá mantener un acceso al menos cada 500 m; siempre que las condiciones geomorfológicas de la playa lo permitan.

5.5.c Se debe señalar e informar al usuario acerca de las características de la playa como oleaje, corrientes de retorno, pendiente de la playa, áreas y situaciones de riesgo.

5.5.d Ante el conocimiento de presencia de marea roja, se debe advertir al público acerca de este evento.

- 5.5.e Se debe señalar al usuario la ubicación de la estación de servicios de emergencia más cercana.
- 5.5.f Se debe contar con salvavidas y equipo indispensable de salvamento en playa.
- 5.5.g Se debe contar con accesos y servicios adecuados para discapacitados.
- 5.5.h El abastecimiento de combustible, mantenimiento y limpieza para los equipos motorizados acuáticos se debe realizar fuera de la playa a certificar.
- 5.5.i No se permitirá que ningún tipo de vehículo circule ó se estacione sobre la playa o sobre las dunas, a excepción de aquellos que prestan servicios públicos de limpia, vehículos de seguridad y aquellos de remolque de embarcaciones.

#### 5.6 De educación ambiental

- 5.6.a Se debe señalar la prohibición de arrojar residuos sólidos fuera de los botes de almacenamiento temporal.
- 5.6.b En caso de ubicarse en playas de anidación y/o de campamentos tortugueros se debe señalar al público, medidas de protección para evitar afectar las especies.
- 5.6.c Se debe dar difusión de la información referente a lo siguiente:
  - 5.6.c.1 Calidad del agua con la información del último muestreo realizado.
  - 5.6.c.2 Manejo de residuos sólidos y su clasificación.
  - 5.6.c.3 Las restricciones ambientales de uso en la playa.
  - 5.6.c.4 En playas que se encuentren arrecifes coralinos deberá existir señalización que indique no tocar los corales.
- 5.6.d Los interesados deben contar con programas de educación y difusión ambiental continua que promuevan la participación de empleados, escolares, comunidad y gobierno.
- 5.6.e Los programas a que se refiere el numeral anterior deben promover la sensibilización de la población sobre los daños derivados de las acciones humanas que inciden en la conservación de la flora y la fauna de la localidad.

En el caso de playas prioritarias para la conservación se debe cumplir con lo siguiente:

#### 5.7 De calidad de agua de mar

- 5.7.a Debe considerar los criterios que establecen las disposiciones: 5.1.1 al 5.1.7.

#### 5.8 De residuos sólidos

- 5.8.a Debe considerar los criterios que establecen las disposiciones: 5.2.1 al 5.2.9 y del 5.2.11 al 5.2.13.
- 5.8.b La frecuencia del servicio de limpia será de acuerdo con la generación diaria de residuos sólidos y la afluencia de visitantes, la recolección de residuos sólidos en la playa se realizará únicamente en forma manual.

#### 5.9 De Infraestructura costera

- 5.9.a Debe considerar los criterios que establecen las disposiciones 5.3.1 al 5.3.4.
- 5.9.b Toda aquella infraestructura que se desee construir debe de ubicarse por lo menos 5 m por detrás del segundo cordón de dunas. En sitios donde la presencia de dunas no sea fácilmente identificable, ya sea por su tamaño o por que hayan sido removidas, en caso de existir la franja de vegetación permanente se utilizará ésta, para ubicar detrás la infraestructura deseada.
- 5.9.c El establecimiento de infraestructura a que se refiere la disposición anterior, debe ser únicamente de bajo impacto hincada sobre palafitos para permitir el transporte de sedimentos hacia la playa. Este requisito debe cumplirse además en la zona terrestre adyacente.

- 5.9.d Se prohíbe la remoción de la vegetación sobre la duna.
- 5.9.e Los accesos a las playas a través de dunas se deben realizar por medio de andadores de madera que se construyan utilizando técnicas apropiadas que eviten su erosión y permitan el paso constante de los usuarios a la playa sin el deterioro de la duna.
- 5.9.f La infraestructura debe ser acorde con la configuración natural del entorno, priorizando el uso de los materiales de la región.

#### 5.10 De biodiversidad

- 5.10.a Debe considerar los criterios que establecen las disposiciones 5.4.1 al 5.4.10.
- 5.10.b La infraestructura no debe impedir la continuidad de la vegetación natural permitiendo la movilización de la fauna silvestre, dentro de la zona terrestre adyacente de la playa a certificar.
- 5.10.c Se implementarán acciones de reforestación con vegetación nativa en la zona terrestre adyacente dentro de la extensión de la playa a certificar.

#### 5.11 De seguridad y servicios

- 5.11.a Debe considerar los criterios que establecen las disposiciones 5.5.2 y 5.5.3.
- 5.11.b En el caso de playas dentro de ANP la señalización debe realizarse conforme a los lineamientos de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- 5.11.c No se permitirá que ningún tipo de vehículo circule o se estacione sobre la playa.

#### 5.12 De contaminación por ruido

- 5.12.a Las embarcaciones de recreo deben contar con motores con un límite máximo de 70 decibeles.

#### 5.13 De educación ambiental

- 5.13.a Debe considerar los criterios que establecen las disposiciones 5.6.1 al 5.6.5.
- 5.13.b En el caso de playas dentro de ANP se debe incluir, además, señalización con información general del ANP y de las actividades permitidas en la zona de acuerdo al Programa de Conservación y Manejo respectivo.

## INICIATIVAS Y CONTRIBUCIONES DE GESTIÓN AMBIENTAL

- 6.1 Se reconocerá a través de puntaje adicional en playas para uso recreativo y playas prioritarias para la conservación, de conformidad con la Tabla 1 cualquiera de las siguientes acciones:

#### Municipios

- 6.1.a Convenios de concertación con particulares para llevar a cabo acciones concretas para la protección, preservación y restauración del medio ambiente en la playa.
- 6.1.b Que formulen y expidan programas de ordenamiento ecológico local del territorio.
- 6.1.c Que se recicle el 25%, como mínimo, del total de la generación de residuos sólidos, en el municipio.
- 6.1.d En caso de contar con convenios de coordinación fiscal para la ZOFEMAT, se destinan los recursos recaudados para la limpieza y protección de las playas.

#### Personas físicas y demás personas morales



6.1.e Convenios de concertación con autoridades municipales, estatales y/o federales para llevar a cabo acciones concretas para la protección, preservación y restauración del medio ambiente en la playa.

6.1.f Que cuenten con programas, planes y/o proyectos en coordinación con ONG`s y académicos para la protección de la biodiversidad, el manejo y conservación de la vida silvestre de conformidad con la normatividad ambiental aplicable, gestión eficiente del agua y/o acciones para la gestión integral de residuos sólidos que vayan más allá de las obligaciones que establece la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y demás ordenamientos jurídicos aplicables.

## PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE LA CONFORMIDAD

La Evaluación de la Conformidad de la presente Norma se realizará a petición de parte, de conformidad con lo dispuesto por la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y su Reglamento, además de lo siguiente:

7.1 La evaluación de la conformidad de la presente norma se realizará por las personas acreditadas y aprobadas por la SEMARNAT.

7.2 En caso de que no existan personas acreditadas y aprobadas, la evaluación de la conformidad será realizada por la SEMARNAT.

7.3 La SEMARNAT deberá dar a conocer los listados de las personas acreditadas y aprobadas, para lo cual, los interesados podrán acudir a la misma, a sus delegaciones federales o consultar la página electrónica ([www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx)).

7.4 El interesado solicitará por escrito, a la persona acreditada de su elección, la evaluación de la conformidad de la presente norma.

7.5 Durante la visita de evaluación, la persona acreditada comprobará objetivamente que se mantiene el cumplimiento de las disposiciones contenidas en la presente norma.

7.6 La verificación del cumplimiento de los requisitos establecidos en los numerales 5.1.1 al 5.1.3 se efectuará a través de los laboratorios de prueba.

7.7 La persona acreditada emitirá un dictamen con los resultados de la evaluación de la conformidad de la presente norma, el cual se entregará al interesado.

7.8 En caso de que a petición de parte el interesado solicite la certificación a la persona acreditada para tal efecto, se deberá cumplir con el siguiente procedimiento:

## PROCEDIMIENTO PARA OBTENER EL CERTIFICADO

7.8.a El interesado manifestará su interés de obtener el certificado a través de un escrito dirigido a la persona acreditada de su elección, acompañando el dictamen y los informes del laboratorio de prueba.

7.8.b La persona acreditada revisará el grado de cumplimiento de la presente norma derivado del dictamen presentado, a fin de valorar el porcentaje alcanzado para el nivel que corresponda, siendo necesario cumplir con el porcentaje mínimo en todos los grupos para obtener el certificado en el nivel correspondiente.

7.8.c La resolución de la persona acreditada debe ser fundada y en apego al mecanismo de evaluación establecido en la presente norma.

7.8.d El certificado debe tener la siguiente información:

7.8.d.1 Nombre del interesado que solicitó la certificación.

7.8.d.2 Nombre, ubicación y delimitación de la playa certificada.

7.8.d.3 Nivel que corresponda de acuerdo al puntaje obtenido. (TABLA 1)

7.8.d.4 Vigencia de la certificación.

7.8.d.5 Logotipo y firma de la persona acreditada.

#### Vigencia y Ratificación

7.8.e La vigencia del certificado será de dos años, y podrá ratificarse por periodos iguales.

7.8.f Para ratificar la certificación se deberán efectuar muestreos de seguimiento de acuerdo a lo que se refiere los numerales 5.1.1 y 5.1.2, en los meses de marzo, junio y noviembre y adjuntar los resultados a la solicitud de ratificación que deberá tramitarse con un mes de anticipación al vencimiento de la vigencia del certificado.

7.8.g El interesado debe elegir y solicitar una visita de evaluación de una persona acreditada, para monitorear el cumplimiento de los requisitos que se cubrieron al momento de otorgar la certificación.

7.8.h En caso de que el interesado desee obtener un nivel superior en el certificado, conforme a la Tabla 1, debe realizarse una evaluación completa de la conformidad de la presente norma mexicana.

#### Cancelación

7.8.i A solicitud del interesado, de la SEMARNAT o de la persona acreditada se podrán realizar evaluaciones aleatorias, para verificar el cumplimiento de las especificaciones y requisitos bajo los cuales se otorgó el certificado, atendiendo en todo caso las solicitudes formuladas por escrito por cualquier ciudadano respecto a irregularidades que presenten playas que cuentan con el certificado.

7.8.j En caso de incumplimiento deberá iniciarse un procedimiento de cancelación al interesado.

7.8.k La persona acreditada podrá allegarse de la información necesaria para emitir su dictamen de cancelación, y debe notificar por escrito al interesado su resolución.

**TABLA 1.- Tabla de valoración y evaluación modalidad playas para uso recreativo**

**CS: Calidad Sanitaria. CSEG: Calidad de Seguridad. CSERV: Calidad de Servicios. CDA: Calidad de Desempeño Ambiental**

DISPOSICIÓN	METODOLOGÍA	CRITERIOS DE VALORACIÓN	PUNTAJE	GRUPO
<b>5.1 DE CALIDAD DE AGUA DE MAR, LAGUNAS COSTERAS Y ESTUARIOS.</b>				
<b>5.1.1</b> (5.1.2, 5.1.3 y Apéndices normativos I y II)	<b>Calidad bacteriológica del agua</b>			
	Muestreos semanales con 3 meses previos a la certificación (total 12 muestras).	0 – 100 Enterococos NMP/100 ml	Cumplimiento necesario.	CS
<b>5.1.4</b>	Inspección visual	Ausencia	4	CDA
<b>5.1.5</b>	Inspección visual	Ausencia	6	CS
<b>5.1.6</b>	Inspección visual	Ausencia	8	CS
<b>5.1.7</b>	Reporte del análisis de la descarga o Reporte del generador a CNA y presentar en un plano a escala 1:1,000 la ubicación de la descarga en la zona terrestre adyacente y señalar el tipo de tratamiento. <i>Aplicable en caso de que el generador sea el interesado.</i>	Cumplimiento	12	CS
<b>5.2 DE RESIDUOS SÓLIDOS</b>				
<b>5.2.1</b>	Metodología del Apéndice normativo III	Cumplimiento	16	CS
<b>5.2.2</b>	Metodología del Apéndice normativo III	Cumplimiento	11	CS
<b>5.2.3</b>	Inspección visual	Ausencia	16	CS
<b>5.2.4</b>	Inspección visual	Ausencia	14	CS

DISPOSICIÓN	METODOLOGÍA	CRITERIOS DE VALORACIÓN	PUNTAJE	GRUPO
5.2.5	Inspección visual	Ausencia	3	CDA
5.2.6	Documentos que acrediten que el Programa se encuentra en proceso o implementación.	Cumplimiento	4	CDA
5.2.7 y 5.2.8	Inspección visual	Ausencia	27	CSERV
5.2.9	Inspección visual <i>En caso de que aplique.</i>	Ausencia	3	CDA
5.2.10	Pruebas testimoniales de prestadores de servicios turísticos o residentes de la comunidad, previa identificación oficial.	Cumplimiento	18	CSERV
5.2.11	Programa de recolección de residuos sólidos en los cauces fluviales en su caso. <i>En caso de que aplique.</i>	Cumplimiento	5	CDA
5.2.12	Inspección visual. <i>En caso de que aplique.</i>	Ausencia	4	CDA
5.2.13	Plano a escala 1:1,000 en la zona terrestre adyacente, en el que se identifiquen la ubicación y el tipo de contaminante. <i>En caso de que aplique.</i>	Cumplimiento	3	CDA
<b>5.3 INFRAESTRUCTURA COSTERA</b>				
5.3.1	Inspección visual. Autorización de impacto ambiental de la instalación portuaria.	Cumplimiento	3	CDA
5.3.2	Inspección visual.	Cumplimiento	3	CDA
5.3.3	Inspección visual. <i>En caso de que aplique.</i>	Cumplimiento	4	CDA
5.3.4	Inspección visual. <i>En caso de que aplique.</i>	Ausencia	4	CDA

DISPOSICIÓN	METODOLOGÍA	CRITERIOS DE VALORACIÓN	PUNTAJE	GRUPO
<b>5.4 BIODIVERSIDAD</b>				
5.4.1	Descripción general de especies de flora y fauna terrestre y acuática de la región.	Cumplimiento	3	CDA
5.4.2	Plan de manejo acreditado. <i>En caso de que aplique.</i>	Cumplimiento	4	CDA
5.4.3	Inspección visual.	Cumplimiento	Cumplimiento obligatorio de acuerdo a la Ley General de Vida Silvestre	CDA
5.4.4	Inspección visual. <i>En caso de que aplique.</i>	Presencia/ Cumplimiento	3	CDA
5.4.5	Inspección visual. <i>En caso de que aplique.</i>	Cumplimiento	3	CDA
5.4.6	Inspección visual. <i>En caso de que aplique.</i>	Cumplimiento	12	CSERV
5.4.7	Inspección visual.	Cumplimiento	4	CDA
5.4.8	Inspección visual.	Cumplimiento	3	CDA
5.4.9	Inspección visual	Cumplimiento	4	CDA
5.4.10.1	Inspección visual. <i>En caso de que aplique.</i>	Ausencia	4	CDA
5.4.10.2	Personal de vigilancia en época de arribazón y anidación de las tortugas marinas. <i>En caso de que aplique.</i>	Presencia	5	CDA
5.4.10.3	Inspección visual nocturna. <i>En caso de que aplique.</i>	Cumplimiento	5	CDA

DISPOSICIÓN	METODOLOGÍA	CRITERIOS DE VALORACIÓN	PUNTAJE	GRUPO
<b>5.5 DE SEGURIDAD Y SERVICIOS</b>				
5.5.1	Reglas de operación y zonificación documentada y validada por lo menos de los prestadores de servicio o la comunidad.	Cumplimiento	21	CSEG
5.5.2	Inspección visual.	Cumplimiento	21	CSERV
5.5.3	Inspección visual.	Presencia/ Cumplimiento	21	CSEG
5.5.4	Inspección visual.	Cumplimiento	10	CS
5.5.5	Inspección visual.	Presencia/ Cumplimiento	21	CSEG
5.5.6	Inspección visual.	Presencia/ Cumplimiento	21	CSEG
5.5.7	Inspección visual.	Presencia/ Cumplimiento	22	CSERV
5.5.8	Inspección visual.	Cumplimiento	5	CDA
5.5.9	Inspección visual.	Cumplimiento	16	CSEG
<b>5.6 DE EDUCACIÓN AMBIENTAL</b>				
5.6.1	Inspección visual.	Presencia/ Cumplimiento	3	CDA
5.6.2	Inspección visual diurna y nocturna. <i>En caso de que aplique.</i>	Cumplimiento	4	CDA
5.6.3.1	Difusión a través de medios impresos publicitarios con la información de calidad del agua	Cumplimiento	7	CS
5.6.3.2	Difusión a través de medios impresos publicitarios con la información de manejo de residuos sólidos y su clasificación.	Cumplimiento	3	CDA

DISPOSICIÓN	METODOLOGÍA	CRITERIOS DE VALORACIÓN	PUNTAJE	GRUPO
5.6.3.3	Difusión a través de medios impresos publicitarios con la información de las restricciones ambientales de uso en la playa.	Cumplimiento	3	CDA
5.6.4 y 5.6.5	Un programa de participación comunitaria acreditado, que incluyan las acciones humanas que incidan negativamente en la conservación de la flora y fauna de la localidad acreditado.	Cumplimiento	4	CDA
<b>6. INICIATIVAS Y CONTRIBUCIONES DE GESTIÓN AMBIENTAL</b>				
<b>6.1</b> Se reconocerá a través de puntaje adicional en playas para uso recreativo y playas prioritarias para la conservación, de conformidad con la tabla 1 cualquiera de las siguientes acciones:				
<b>Municipios</b>				
6.1.1	Acciones de cumplimiento de los Convenios de concertación.	Cumplimiento	2	CDA
6.1.2	Programas de OET.	Cumplimiento	4	CDA
6.1.3	Reporte que incluya indicadores de regeneración, clasificación de residuos y descripción del reciclaje.	Cumplimiento	3	CS
6.1.4	Documento comprobatorios de los ingresos que se obtengan por el cobro del derecho y de las acciones de vigilancia, preservación y limpieza de las playas.	Cumplimiento	5	CDA
<b>Personas físicas y demás personas morales</b>				
6.1.5	Acciones de cumplimiento de los Convenios de concertación.	Cumplimiento	2	CDA
6.1.6	Programas, planes y/o proyectos.	Cumplimiento	2	CDA

<b>PORCENTAJE MÍNIMO DE CUMPLIMIENTO MODALIDAD DE PLAYAS PARA USO RECREATIVO</b>			
<b>GRUPOS/NIVEL</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Calidad Sanitaria (CS)</b>	<b>60 %</b>	<b>75%</b>	<b>90%</b>
<b>Calidad de Seguridad (CSEG)</b>	<b>50%</b>	<b>70%</b>	<b>90%</b>
<b>Calidad de Servicios (CSERV)</b>	<b>45%</b>	<b>65%</b>	<b>90%</b>
<b>Calidad de Desempeño Ambiental (CDA)</b>	<b>50%</b>	<b>70%</b>	<b>90%</b>

**TABLA 2.-** Tabla de valoración y evaluación modalidad playas prioritarias para la conservación

**CS:** Calidad Sanitaria. **CSEG:** Calidad de Seguridad. **CSERV:** Calidad de Servicios. **CDA:** Calidad de Desempeño Ambiental

<b>DISPOSICIÓN</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>CRITERIOS DE VALORACIÓN</b>	<b>PUNTAJE</b>
<b>5.7 DE CALIDAD DE AGUA DE MAR</b>			
<b>5.7.1 Consultar la tabla 1 de evaluación de las disposiciones: 5.1.1 al 5.1.7</b>			
<b>5.8 DE RESIDUOS SÓLIDOS</b>			
<b>5.8.1 Consultar la tabla 1 de evaluación de las disposiciones: 5.2.1 al 5.2.9 y del 5.2.11 al 5.2.13.</b>			
<b>5.8.2</b>	Pruebas testimoniales de prestadores de servicios turísticos o residentes de la comunidad, previa identificación oficial.	Cumplimiento	8



DISPOSICIÓN	METODOLOGÍA	CRITERIOS DE VALORACIÓN	PUNTAJE
<b>5.9 DE INFRAESTRUCTURA COSTERA</b>			
<b>5.9.1 Consultar la tabla 1 de evaluación de las disposiciones: 5.3.1 al 5.3.4.</b>			
5.9.2	Inspección visual	Cumplimiento	10
5.9.3	Inspección visual	Cumplimiento	8
5.9.4	Inspección visual	Cumplimiento	11
5.9.5	Inspección visual	Cumplimiento	9
5.9.6	Inspección visual	Cumplimiento	8
<b>5.10 DE BIODIVERSIDAD</b>			
<b>5.10.1 Consultar la tabla 1 de evaluación de las disposiciones: 5.4.1 al 5.4.8 y 5.4.10</b>			
5.4.9	Inspección visual	Cumplimiento	5
5.10.2	Inspección visual	Cumplimiento	8
5.10.3	Inspección visual	Cumplimiento	7
<b>5.11 DE SEGURIDAD Y SERVICIOS</b>			
<b>5.11.1 Consultar la tabla 1 de evaluación de las disposiciones: 5.5.2 y 5.5.3</b>			
5.11.2	Inspección visual. <i>En caso de que aplique.</i>	Cumplimiento necesario.	9

DISPOSICIÓN	METODOLOGÍA	CRITERIOS DE VALORACIÓN	PUNTAJE
<b>5.12 DE CONTAMINACIÓN POR RUIDO</b>			
5.12.1	Decibeles No mayor a 70 decibeles, embarcaciones de cuatro tiempos.	Cumplimiento	8
<b>5.13 DE EDUCACIÓN AMBIENTAL</b>			
<b>5.13.1 Consultar la tabla 1 de evaluación de las disposiciones: 5.6.1 al 5.6.5.</b>			
5.13.2	Inspección visual. <i>En caso de que aplique.</i>	Cumplimiento	9
<b>6. INICIATIVAS Y CONTRIBUCIONES DE GESTIÓN AMBIENTAL</b>			
<b>6.1 Consultar la tabla 1 de evaluación de las disposiciones: 6.1.1 a la 6.1.6</b>			

PORCENTAJE MÍNIMO DE CUMPLIMIENTO EN LA MODALIDAD DE PLAYAS PRIORITARIAS PARA LA CONSERVACIÓN		
ATRIBUTOS/NIVEL	1	2
Agua	75%	95%
Residuos Sólidos		
Biodiversidad		
Infraestructura Costera		
Seguridad y Servicios		
Contaminación por ruido		
Educación Ambiental		

**CONCORDANCIA CON NORMAS INTERNACIONALES**

Esta norma mexicana no es equivalente a ninguna norma internacional por no existir referencia alguna al momento de su elaboración. NMX-AA-120-SCFI-2006

## APÉNDICE NORMATIVO I

### LINEAMIENTOS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE AGUA DE MAR PARA USO RECREATIVO CON CONTACTO PRIMARIO

(Procedimiento de Muestreo, Preservación de las Muestras y Almacenamiento)

#### Procedimiento de muestreo

Las muestras se tomarán en los lugares donde haya más afluencia de turistas de acuerdo a las siguientes consideraciones:

- Para zonas de oleaje tranquilo, tomar las muestras en áreas donde la profundidad del agua llegue a 1m aproximadamente (cintura del verificador), la muestra debe tomarse a contracorriente del flujo entrante y a 30 cm aproximadamente bajo la superficie del agua.
- Para zonas de playa con rompiente cercana a la orilla, pasar la rompiente a una profundidad del agua de 1m – 1,15 m. El verificador debe colocarse a contracorriente del flujo entrante y tomar la muestra de agua a 30 cm bajo la superficie del agua. Si la pendiente del fondo es pronunciada, tomar la muestra en la orilla, donde la profundidad del agua esté entre el tobillo y la rodilla, llenar el recipiente procurando que contenga un mínimo de arena. En la orilla de la playa anotar en la hoja de verificación, bitácora o cadena de custodia la identificación de la muestra y la hora. Llenar los datos de la etiqueta del envase con fecha y hora del muestreo, identificación de la muestra e iniciales del verificador.

De acuerdo al recipiente:

a) Frasco de vidrio.- Aflojar levemente el tapón del frasco y el papel de protección, manejándolos como unidad y evitando que se contamine el tapón o el cuello del frasco. Introducir el frasco con la boca hacia abajo hasta la profundidad seleccionada al tipo de playa, quitar el tapón e invertir el frasco para llenarlo hasta que quede 1/3 del frasco del volumen libre, poner el tapón y sacar el frasco.

b) Bolsa de plástico.- Quitar la tira de seguridad a la bolsa, introducir la bolsa cerrada a la profundidad deseada, la cual debe quedar en sentido contrario al flujo de corriente (para evitar que el agua toque primero las manos del verificador y después entre en la bolsa), una vez que se llena hasta el 80%-90% de su volumen se cierra, se saca la bolsa del agua. Mientras se jalan con fuerza los alambres, girar la bolsa varias veces, unir los extremos del alambre y retorcerlos entre sí. Llenar dos bolsas de muestra para cada sitio.

c) Tomar dos muestras por cada estación de muestreo.-Para control de calidad del laboratorio es necesario tomar una muestra adicional en el primer punto de muestreo.

#### Material

##### Recipientes para toma de muestras bacteriológicas

• Frascos.- De color transparente o ámbar, con tapón esmerilado, estéril y bacteriológicamente inerte, con capacidad de 125 ml ó 250 ml. Se pueden utilizar recipientes de vidrio de borosilicato de boca ancha con tapón de rosca o esmerilado, estériles.

• Bolsas de plástico.- Bolsas de polietileno, estériles, con sello hermético y de 180 ml a 300 ml de capacidad. (En ambos casos debe ser sin tiosulfato de sodio en los recipientes)

##### Preservación de las muestras y almacenamiento

Las muestras de agua deben preservarse de a 1°C a 5°C y a la oscuridad durante su transporte al laboratorio, con lo cual deben de ser procesadas para su análisis inmediato ó si esto no es posible, no rebasar 24 h tomadas desde la obtención de la muestra hasta que inicia el análisis de laboratorio. Las muestras deben ser colocadas en hielo y para evitar contaminación se debe evitar la total inmersión de los recipientes. Bajo ningún motivo deben congelarse.

## APÉNDICE NORMATIVO II

### LINEAMIENTOS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE AGUA DE MAR PARA USO RECREATIVO CON CONTACTO PRIMARIO

(Método Analítico)

Método analítico

Método del sustrato cromogénico definido

### 1 Introducción

La determinación de organismos Enterococos por medio del sustrato cromogénico, se fundamenta en el uso de sustratos cromogénicos hidrolizables para la detección de enzimas del grupo Enterococo como *E. faecium* y *E. faecalis*. Cuando se utiliza esta técnica, el grupo se define como todas las bacterias que poseen la enzima  $\beta$ -glucosidasa y capaces de romper el sustrato cromogénico, dando como resultado una liberación del cromógeno.

La prueba puede usarse tanto en tubos múltiples como en formato presencia-ausencia (muestras individuales de 100 ml). La obtención de resultados válidos requiere la aplicación estricta de los procedimientos de control de calidad.

### Principio

El método Enterolert emplea un indicador nutriente que emite fluorescencia cuando es metabolizado por las bacterias del grupo Enterococo. La tecnología del sustrato definido evita la necesidad de utilizar azida de sodio utilizada en los métodos tradicionales. El sustrato cromogénico tal como el orto-nitrofenil- $\beta$ -D galactopiranosido (ONPG) u otro equivalente, es empleado para detectar la enzima  $\beta$ -glucosidasa, la cual es producida por bacterias el grupo Enterococo. (Aprobado por la American Society for Testing and Materials # D-6503-99)

La enzima  $\beta$ -glucosidasa hidroliza al sustrato y provoca un cambio de color, el cual indica y sustenta una prueba positiva después de 24 h sin procedimientos adicionales.

En lo que se refiere a Enterococos, un sustrato fluorogénico como el 4-metilumbeliferil-(--D-glucorónido (MUG) es utilizado para detectar la enzima  $\beta$ -glucosidasa). La enzima ( $\beta$ -glucosidasa) hidroliza el sustrato, produciendo fluorescencia cuando el líquido es expuesto a la luz ultravioleta de onda larga (365 nm).

### Aplicaciones

Las muestras de agua que contienen materiales húmicos o de otro tipo pueden ser turbias. Si hay color de fondo, se comparan los tubos inoculados con un tubo de control únicamente muestra de agua.

La prueba del sustrato cromogénico no se usa para verificar siembras presuntivas de Enterococos o colonias de filtración con membrana porque el sustrato puede ser sobrecargado por el inóculo pesado de glucosidasa débil producido por no Enterococos, causando resultados falsos positivos ó por lecturas que sobre las 24 h (por ejemplo 28 h).

### Formulación del sustrato

Las formulaciones del sustrato se presentan comercialmente en tubos múltiples o en recipientes para muestras de 100 ml para la determinación de presencia /ausencia. También son aprovechables porciones prepesadas del reactivo para mezclar y dosificar en tubos múltiples para pruebas de 10 ml u otros recipientes para muestras de 100 ml. Se requiere de un proveedor confiable para el aseguramiento de calidad y uniformidad del sustrato comercial. Se debe evitar la exposición prolongada del sustrato a la luz directa del sol.

La formulación en polvo contiene los siguientes compuestos anhidros (por litro de sustrato preparado):

Sulfato de amonio (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5,00 g

Sulfato de manganeso, MnSO<sub>4</sub> 0,0005 g

Sulfato de zinc, ZnSO<sub>4</sub> 0,0005 g

Sulfato de magnesio, MgSO<sub>4</sub> 0,10 g

Cloruro de sodio, NaCl 10,0 g

Cloruro de calcio, CaCl<sub>2</sub> 0,05 g

Sulfito de sodio, Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 0,04 g

Amfotericina B 0,001 g

O-Nitrofenil- $\beta$ -D-galactopiranosido 0,50 g

4-metilumbeliferil- $\beta$ -D-glucorónico 0,075 g

Solanio 5,3 g

Buffer Hepes de ac, orgánicos 6,9 g

#### Procedimiento

Procedimiento de tubos múltiples. Se prepara una dilución 1:10 con agua destilada estéril. Por ejemplo, 10 ml. de muestra con 90 ml. de agua estéril. Separe cuidadosamente un paquete de reactivo en polvo, procurando no abrir el paquete siguiente.

Golpee el paquete ligeramente para hacer que todo el polvo Enterolert se acumule en la parte inferior del paquete. Abra el paquete rompiendo la parte superior a nivel de la raya cuidando no tocar la apertura del paquete.

Agregue el reactivo a una muestra diluida previamente 1:10. Tape y selle el recipiente de forma aséptica. Agite para disolver el reactivo por completo. Vierta la mezcla de muestra y reactivo en el dispositivo (charolas) del sellador, evitando tocar la lengüeta metálica.

Identifique la charola con la muestra correspondiente. Selle con calor la charola con la muestra para distribuirla en los 49 tubos grandes y 24 pequeños de la charola. Incube durante 24 h a  $41^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Lea los resultados al cabo de 24 h.

Cuente el número de celdas fluorescentes de la charola. Es posible que la intensidad de las celdas positivas varíe. Consulte la tabla de NMP anexa para determinar el número más probable de Enterococos en la muestra. La distribución de las celdas en la charola corresponde a las tablas de número más probable con 95 % de límite de confianza del Standard Methods.

El procedimiento también puede ser desarrollado con la adición de cantidades apropiadas del sustrato reactivo a la muestra, mezclando vigorosamente y dosificado en cinco o diez tubos estériles. Incube a  $35^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  por 24 h.

Procedimiento de presencia/ausencia. Adicione asépticamente sustrato enzimático prepesado a 100 ml de muestra en un vaso, estéril, transparente, no fluorescente de borosilicato o en una botella o recipiente equivalente. Opcionalmente adicionar 100 ml de muestra de sustrato enzimático en un recipiente provisto por el fabricante. Tape asépticamente y mezcle vigorosamente para disolver. Incube a  $41^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  por 24 h.

#### Interpretación

Después de 24 h de incubación examine si existe cambio de color en los tubos o recipientes. Cuando el sustrato es hidrolizado por la enzima de la bacteria produce un color azul; algunos sustratos usados en otras formulaciones pueden producir respuestas de diferente color.

La respuesta cromogénica descrita es una reacción positiva para Enterococos totales. Si el cambio de color no es uniforme en todo el tubo, mezcle por inversión antes de la lectura. Comparar cada tubo nuevamente con el comparador de color disponible de la fuente comercial del sustrato. Si la intensidad del color es mayor o igual a la del comparador, los Enterococos totales están presentes.

Las muestras son negativas para Enterococos si no se observa color. La respuesta cromogénica es cuestionable si el tiempo de incubación sobrepasa las 24 h, si incubó por 28 h puede haber poco desarrollo de fluorescencia e interpretarse como negativo o puede desarrollarse más celdas fluorescentes e interpretarse con falsos positivos.

#### Reporte

Si se desarrolló el procedimiento del NMP, calcular el valor de NMP del número de tubos o celdas positivos, de acuerdo a las tablas de número más probable, correspondientes al sistema utilizado; si se utiliza el procedimiento de presencia/ausencia, reportar resultados de Enterococos totales presentes a ausentes en 100 ml de muestra.

#### Control de calidad

Pruebe cada lote del sustrato comercial desarrollando la prueba por inoculación de tres bacterias de control: *Enterococcus faecium* ATCC 35667, *Serratia marcescens* (gram-)

ATCC 43862, *Aerococcus viridans* (gram +) ATCC 10400. El primero produce fluorescencia pero el segundo y tercero no la producen.

Evite el uso de inóculos pesados. Si se usan *Pseudomonas* como el no *Enterococos* representativo, seleccione una especie no fluorescente. Incube estos controles  $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm$

$0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 h. Lea y registre los resultados. Para cada cepa bacteriana, tome un asa de 1 l del tubo de ensayo y utilícela para inocular un recipiente rotulado que contenga 100 ml de agua deionizada estéril. Estas soluciones servirán de control.

Medidas de seguridad

Asegurar que la fuente de luz UV sea de onda larga (365 nm). En caso de usar una fuente más poderosa como de 15 watts, usar lentes o goggles protectores de los ojos.

Método de Tubos Múltiples

Materiales y medio de cultivo

a) Caldo de azida dextrosa

Extracto de carne 4,5 g

Triptona o polipeptona 15,0 g

Glucosa 7,5 g

Cloruro de sodio, NaCl 7,5 g

Azida de sodio,  $\text{NaN}_3$  0,2 g

Agua grado reactivo 1 L

Debe estar a un pH de 7,2 ( $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $25^{\circ}\text{C}$  después de esterilización).

b) Agar de *Enterococos* selectivo PSE

Peptona C (triptona) 17,0 g

Peptona B (proteosa peptona) 3,0 g

Extracto de levadura 5,0 g

Bilis bacteriológica 10,0 g

Cloruro de sodio, NaCl 5,0 g

Citrato de sodio 1,0 g

Esculina 1,0 g

Citrato férrico de amonio 0,5 g

Azida de sodio,  $\text{NaN}_3$  0,25 g

Agar 15,0 g

Agua grado reactivo 1 L

Debe estar a un pH de  $7,1 \pm 0,2$  después de esterilización. Mantener el medio por no más de 4 h de  $45^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$  antes de verterlos en las cajas de cultivo.

Procedimiento de prueba presuntiva

Inocular una serie de tubos de caldo de azida dextrosa con porciones de muestra de 10 ml o menos. Usar caldo reforzado para inocular 10.0 ml. Las porciones usadas pueden llegar a variar en tamaño y número de acuerdo al tipo de muestras. Usar sólo múltiplos decimales de 1 ml.

Incubar los tubos inoculados a  $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Examinar cada tubo por turbiedad al final de  $24 \pm 2$  h, si no se encuentra turbiedad, en caso de no encontrar reincubar y volver a leer al final de 48 (3 h.)

Procedimientos de prueba confirmativa

Tomar todos los tubos con caldo de dextrosa azida que mostraron turbiedad después de 24 a 48 h de incubación como positivos.

Sembrar una porción de crecimiento de cada uno de los tubos positivos de caldo de dextrosa azida en agar PSE. Incubar en las cajas invertidas a  $35^{\circ}\text{C}$  ( $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24, 2 h.). Colonias café negruzcas con halos color café confirma la presencia de *estreptococos* fecales.

Las colonias café negruzcas con halos de color café pueden ser transferidas a tubos con caldo de infusión de cerebro-corazón conteniendo 6,5 % de NaCl. El crecimiento en caldo de NaCl al 6,5% y a 45°C, indican que las colonias pertenecen al grupo de Enterococos.

Estimar la densidad de estreptococos fecales del número de tubos en cada serie de diluciones que fueron positivos en PSE. Similarmente, estimar la densidad de Enterococos del número de tubos en cada serie de dilución conteniendo estreptococos que crecieron en caldo de NaCl al 6,5 %.

Método de filtro de membrana

Aparatos de laboratorio

Para un análisis de filtración de membrana se debe usar cristalería y otros aparatos compuestos de material libre de agentes que pueden afectar el crecimiento bacterial. Botellas de muestreo.

Pipetas graduadas estériles.

Contenedores para medio de cultivo.

Cajas de cultivo.- Puede utilizarse vidrio de borosilicato estéril o desechables, o cajas de Petri plásticas preesterilizadas.

Unidad de filtración.

Filtro de membrana.- El cual de preferencia debe estar esterilizado desde su fabricación.

Almohadilla absorbente.- Debe ser de un material libre de sulfitos o de otras sustancias que pueden inhibir el crecimiento bacterial. Usar almohadillas de aproximadamente 48 mm de diámetro y de un espesor para absorber 1,8 a 2,2 ml de medio.

Incubadoras.- Usar incubadoras que tengan una temperatura de  $35 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  y que pueden mantener una humedad ambiental (humedad relativa del 60%).

Microscopio y fuente de luz.- Para determinar el conteo de colonias en filtro de membrana, usar una magnificación de 10 a 15 diámetros y una fuente de luz fluorescente blanca ajustada a dar un máximo discernimiento del brillo. Preferentemente usar un microscopio con campo binocular amplio.

Conteo.- Contar todas las colonias rojas claras u oscuras utilizando una lámpara fluorescente y una lupa.

Materiales y medio de cultivo

a) m-E Agar para Enterococos

Peptona 10 g

Cloruro de sodio, NaCl 15,0 g

Extracto de levadura 30,0 g

Esculina 1,0 g

Actidiona ciclohexamida 0,05 g

Azida de sodio,  $\text{NaN}_3$  0,15 g

Agar 15,0 g

Agua grado reactivo 1 L

Calentar para disolver los ingredientes, esterilizar y mantener en un baño de agua de 44 a 46°C. Mezclar 0,25 g de ácido nalidixico en 5 ml. de agua grado reactivo, agregar unas pocas gotas de NaOH 0.1 N para disolver el antibiótico, y adicionar al medio basal.

Adicionar 0,15 gr. de 2,35-cloruro tetrazolium trifenilo y mezclar para una buena disolución.

Verter el agar en cajas petri de 9 x 50 mm hasta una altura de 4 a 5 mm

(aproximadamente 4ml a 6 ml), y dejar solidificar. El pH final debe llegar a  $7,1 \pm 0.2$ . Colocar el sobrante en la oscuridad de 2°C a 10°C, después de 30 días tirar el sobrante.

(NOTA: este medio es recomendado para cultivo de Enterococos en aguas recreativas dulces y marinas).

b) EIA substrato

Esculina 1,0 g

Agar 15,0 g

Citrato férrico 0,5 g

Agua grado reactivo 1 L

El pH debe llegar a  $7,1 \pm 0,2$  antes de pasar por la autoclave. Calentar para disolver los ingredientes, esterilizar y mantener en un baño de agua de  $44^{\circ}\text{C}$  a  $46^{\circ}\text{C}$ . Verter el medio en cajas Petri de 50 mm y a una altura de 4 a 5 mm (aproximadamente 4ml a 6 ml), y dejar solidificar.

Preparar el medio fresco por cada grupo de muestras. Mantener el sobrante en la oscuridad de  $2^{\circ}\text{C}$  a  $10^{\circ}\text{C}$ , después de 30 días, tirar el sobrante.

c) m. Enterococos agar para estreptococos fecales

Triptona 20 g

Extracto de levadura 5 g

Glucosa 2,0 g

Fosfato dipotásico,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  4,0 g

Azida de sodio,  $\text{NaN}_3$  0,4 g

2, 3,5-cloruro tetrazolium trifenol 0,1 g

Agar 10 g

Agua grado reactivo 1 L

Calentar para disolver los ingredientes. No utilizar autoclave. Colocar las cajas petri de 9 mm x 50 mm a una profundidad de 4 mm a 5 mm (aproximadamente 4ml a 6 ml) y dejar solidificar. Preparar medio fresco por cada grupo de muestras.

(NOTA: este medio es recomendado para el Grupo D de Estreptococos en agua dulce y marina).

d) Caldo infusión de cerebro-corazón

Infusión de cerebro de ternero 200 g

Infusión de corazón de res 250 g

Peptona proteosa 10,0 g

Glucosa 2,0 g

Cloruro de sodio,  $\text{NaCl}$  5,0 g

Fosfato hidrogenado disódico,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  2,5 g

Agua grado reactivo 1 L

El pH debe llegar a 7,4 después de la esterilización.

e) Agar infusión de cerebro-corazón

Añadir 15,0 g de agar a los ingredientes de caldos de infusión de cerebrocorazón. El pH debe llegar a 7,4 después de la esterilización. Los tubos deben estar inclinados.

f) Agar bilis excluyan

Extracto de res 3,0 g

Peptona 5,0 g

Oxgall 40,0 g

Esculina 1,0 g

Citrato férrico 0,5 g

Agar 15,0 g

Agua grado reactivo 1 L

Calentar para disolver los ingredientes. Colocar 8 ml a 10 ml en tubos inclinados en volumen apropiado. Llevar la autoclave a  $121^{\circ}\text{C}$  durante 15 min. No sobrecalentar debido a que puede causar oscurecimiento del medio.

Mantener de  $44^{\circ}\text{C}$  a  $46^{\circ}\text{C}$  y colocar en tubos inclinados 15 ml ó colocar 15 ml en cajas petri de 15 x 100 mm. El pH final debe llegar a 6.6 (0,2 después de la esterilización).

Mantener a una temperatura de  $4^{\circ}\text{C}$  a  $10^{\circ}\text{C}$ .

Procedimiento

a) m-E Método



1. Seleccionar un tamaño de muestra y filtrar. Filtrar un volumen de muestra apropiado a través de una membrana estéril de 0,45  $\mu\text{m}$ , cuadriculada para tener 20 a 60 colonias en la superficie de la membrana. Se transfiere el filtro al agar en la caja petri, cuidando de no tener burbujas de aire en la membrana.

2. Incubación. Invertir las placas de cultivo e incubar a 41°C (0,5°C) por 48 h.

3. Prueba del sustrato. Después de 48 h por incubación, transferir cuidadosamente el filtro al medio EIA. Incubar a 41°C (0,5 °C por 20 min).

4. Conteo. Colonias de Enterococos rosas a rojas desarrollan un precipitado café rojizo en el fondo del filtro. El conteo de colonia es usando lámpara fluorescente por medio de una lupa.

b) m. Método Enterococos

1. Selección de tamaño de muestra y filtración. Igual al punto 1 del m-E-Método.

2. Incubación. Colocar las cajas por 30 min, posteriormente invertirlos e incubarlos a 35 °C (0,5°C por 48 h).