

DESALACIÓN

UN MAR DE OPORTUNIDADES

COMPILADORES: GERMÁN EDUARDO DÉVORA ISIORDIA, RODRIGO GONZÁLEZ ENRIQUEZ
Y JORGE SALDIVAR CABRALES



ITSON
Educar para
Trascender

COMPILADORES:

GERMÁN EDUARDO DÉVORA ISIORDIA
RODRIGO GONZÁLEZ ENRIQUEZ
JORGE SALDIVAR CABRALES

EDITORES LITERARIOS:

MARISELA GONZÁLEZ ROMÁN
CECILIA ROMÁN SÁNCHEZ

DISEÑO DE PORTADA:

DULCE ISLAS LEE

GESTIÓN EDITORIAL:

OFICINA DE PRODUCCIÓN DE OBRAS LITERARIAS Y CIENTÍFICAS
MTRA. MARISELA GONZÁLEZ ROMÁN

DESALACIÓN

UN MAR DE OPORTUNIDADES



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA
Educar para Trascender

2013, Instituto Tecnológico de Sonora.
5 de Febrero, 818 sur, Colonia Centro,
Ciudad Obregón, Sonora, México; 85000
Web: www.itson.mx
Email: rectoria@itson.mx
Teléfono: (644) 410-90-00

Primera edición 2013
Hecho en México

ISBN: 978-607-609-051-0 (edición impresa)
ISBN: 978-607-609-050-3 (edición electrónica)

Se prohíbe la reproducción total o parcial de la presente obra, así como su comunicación pública, divulgación o transmisión mediante cualquier sistema o método, electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento de información), sin consentimiento por escrito del Instituto Tecnológico de Sonora.

Cómo citar un capítulo de este libro (se muestra ejemplo de capítulo I):

Dévora, G., Valdez, L., Mercado, M., Astorga, S. y Ramos, U. (2013). Desalación de agua de pozos y su empleo en la agricultura, mediante la técnica de osmosis inversa. En Dévora G., González R. y Saldivar J. (Comp.). DESALACIÓN. (pp. 13-22). México: ITSON

DIRECTORIO ITSON

Dr. Isidro Roberto Cruz Medina

Rector del Instituto Tecnológico de Sonora

Mtro. Misael Marchena Morales

Secretaría de la Rectoría

Dr. Jesús Héctor Hernández López

Vicerrectoría Académica

Dr. Jaime Garatuza Payán

Dirección Académica de Recursos Naturales

Mtro. Germán Eduardo Dévora Isiordia

Jefe del Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente

ÍNDICE

Presentación.....	vi
Prólogo.....	viii
Prefacio.....	xi
Capítulo 1. Desalación de agua de pozos y su empleo en la agricultura, mediante la técnica de osmosis inversa.....	13
Capítulo 2. El estado actual de la desalación en el mundo y su proyección en el futuro.....	22
Capítulo 3. Perspectivas de la desalación en el Noroeste mexicano y disposición de las salmueras	41
Capítulo 4. Localización de obra de toma de agua de mar, para instalación de una desaladora en Guaymas, Sonora	60
Capítulo 5. Desalinización en México, el uso de energías no convencionales para desalinización en comunidades rurales	86
Capítulo 6. Ion exchange membrane pair evaluation for electrolytic denitrification and acid-base reclamation	109
Capítulo 7. Suministro de agua salobre a plantas desalinizadoras mediante barreras de pozos que detengan la intrusión salina en acuíferos costeros.....	128
Capítulo 8. Innovación tecnológica en sistemas de desalinización empleando el sistema de electrodiálisis reversible (EDR) ..,.....	140

PRESENTACIÓN

Ante el desarrollo tecnológico actual que muestran los procesos de tratamiento de aguas, por sistemas avanzados de desalación, y el rezago que existe en la generación de empleos, transferencia del conocimiento en materia de desalación en universidades y organismos operadores de agua en México; desde el Instituto Tecnológico de Sonora se han realizado eventos internacionales en materia de desalación de agua de mar y salobres, para reducir la brecha en entrenamiento, capacitación y generación de proyectos de alto valor para la sociedad que satisfagan la creciente demanda del recurso hídrico para consumo humano, agricultura e industria.

De esta manera, en 2007 se realizó en San Carlos Nuevo Guaymas Sonora, el *1er. Encuentro Internacional de desalación en el mar de Cortés*, contando con la presencia de distinguidos expertos de España, Israel, Estados Unidos y México; y en 2009, se realizó el *1er. Congreso Internacional de Desalación*, contando con la presencia de distinguidos expertos de España, Estados Unidos y México.

El objeto de los eventos consistió en analizar desde un enfoque interdisciplinario el problema de suministro, abastecimiento y distribución del agua en el país a través de la desalación de agua. Las diversas ponencias presentadas en los dos eventos fueron de alto valor técnico y sobre todo científico, por presentar costos de los procesos de desalación tanto en sistemas térmicos como de membranas, metodologías para localización de obra de toma, manejo y disposición del vertido de Salmuera, análisis y diseño de plantas desaladoras regionales, nacionales e internacionales.

Para la realización de este objetivo, estuvieron participando entes públicos, universidades públicas y privadas. Los participantes fueron:

1. *Entes públicos:* Comisión Estatal del Agua, Sonora (México), Comisión Nacional del Agua (México), Maquilas Tetakawi, S.A. de C.V. (México), SEMARNAT (México), Universidad de Quintana Roo (México),
2. *Universidades y Centros de Investigación:* Universidad Nacional Autónoma de México (México), Instituto Tecnológico de Sonora (México), Universidad Autónoma de Baja California (México), Universidad de Sonora (México),
3. *Otras instituciones:* International Desalination Association (España) y Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica CIDETEQ (México).
4. *Empresas en materia de desalación:* Inima (España), Procomar (España), Assul (México), CFE (México), Toray (EUA), Nitto Denko (EUA), International Desalination Association (España), Befesa (España), IONICS (EUA), ABSA (México), AVISTA Technologies (EUA), KING LEE (México), General Electric (EUA).

Dichos eventos contaron con la participación de los siguientes *ponentes mexicanos*: Mtro. Armando Canales Elorduy (ITSON), Ing. Víctor Morales (KING LEE), Mtro. Rodrigo González Enríquez (ITSON), Dr. Felipe Correa Diaz (UABC), Mtro. Manuel Fuentes Díaz (IMTA), Germán Eduardo Dévora Isiordia (ITSON), Ing. Nora Estela Ponce Fernández (ITSON), Dr. Roberto Contreras Bustos (UAQ), Dr. Wilverth R. Villatoro Monzón (UAQ), M.I. Alexander Mendoza-Acosta (CONAGUA), Dr. Víctor Pérez Moreno (UAQ). Del extranjero asistieron reconocidos empresarios e investigadores en materia de desalación: Dr. José Antonio Medina San Juan (España), Ing. Mario Alberto Treviño Sánchez (AVISTA, EUA), Ing. Bruno García Cano (INOVA, EUA), Ing. José Luis Escajeda (EUA), Ing. Moisés Pariente (España). Ing. Sonia Muñiz (EUA). Esta compilación rescata las principales ponencias, conferencias, estudios y aportaciones presentados.

PRÓLOGO

Es para la Asociación Internacional de Desalación (IDA) un motivo de satisfacción constar que, el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) realiza una importante apuesta por la desalación, en sus proyectos de investigación y desarrollo y que haya incorporado desde el comienzo el estudio y análisis de los aspectos técnicos de la desalación en programas de curso de la carrera de Ingeniería Química y en temas de tesis a nivel licenciatura, maestría y doctorado. No es frecuente esta iniciativa, pero demuestra una amplia visión de la realidad y del futuro de la desalación que sin duda permitirá obtener avances importantes.

Las lecciones de estos dos Congresos Internacionales donde se han discutido e intercambiado opiniones sobre la situación técnica y ambiental de la desalación de agua de mar con energías renovables, y en la que han participado especialistas de Estados Unidos, España, Chile y de sectores especializados de México, serán sin duda una buena reflexión para ser consideradas antes de iniciar nuevos proyectos.

En el mundo el suministro de agua dulce, ya sea desalando agua de mar o agua salobre de pozo, está en franca expansión: en algunas regiones, con abundantes recursos energéticos como los países árabes del Golfo, en los que escasea el agua, la desalación es desde hace años la única alternativa posible al problema del abastecimiento de agua. Esta situación se repite con algunas diferencias en los países del norte de África y otros de la cuenca del Mediterráneo.

Países como España están recurriendo a la desalación de forma masiva, como la opción más viable para resolver el desequilibrio hídrico existente en las regiones del sur y la costa este Mediterránea, y ya desde hace años se adoptó esta opción en las Islas Canarias, Estados Unidos en sus estados del sur está empezando a pensar en la desalación como elemento importante en la solución de

esos mismos problemas, y en Australia la primera gran planta desaladora de agua de mar está próxima a iniciar su funcionamiento.

En México la situación no es diferente y los problemas de escasez empiezan a aparecer, condicionando el desarrollo en importantes zonas de la península de Baja California y Sonora, cuyo clima y litorales de mar los convierte en Estados con un gran potencial de desarrollo turístico e incluso agrícola. También tendrán que enfrenarse en el corto plazo a problemas de escasez grandes ciudades que siguen creciendo a elevado ritmo, como Tijuana, Ensenada, La Paz, Hermosillo, Guaymas, Puerto Peñasco, Puerto Vallarta, Cozumel, Cancún, etcétera.

Aunque las tecnologías han avanzado considerablemente en los últimos años reduciendo los costos de inversión, los consumos energéticos y el impacto ambiental, y permitiendo, por tanto, la reducción de los costos de producción de agua desalada, no existe una solución única válida para todos los casos, por lo que cada país debe buscar sus verdaderos nichos de oportunidades para resolver sus problemas.

Vemos con mucho interés y entusiasmo las autoridades del Instituto Tecnológico de Sonora y programas educativos consideren dentro de sus proyectos interdisciplinarios de investigación a “la desalación de agua de mar con energías renovables”. Sabemos que el sol y el viento, que abundan en el noroeste del país, pueden contribuir al ahorro de combustibles para desalar. Espero que esta investigación culmine en una aportación de la tecnología mexicana al abastecimiento de agua en otras partes del mundo.

Es importante en la sociedad actual, que los gobiernos y entidades educativas traten de resolver los grandes problemas, como es el de abastecimiento de agua, recurriendo a la tecnología. Hay muchos aspectos sociales, jurídicos y ambientales que a la larga definen la viabilidad de un proyecto. Parece que esto ha sido muy bien comprendido por los investigadores del Instituto Tecnológico de

Sonora y sus cuerpos académicos de Ingeniería de Procesos y de Ciencias del Agua, además de cuerpos académicos colaboradores de reconocidas Universidades de México como: La Universidad Autónoma de Nuevo León, la Universidad Autónoma de México, la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad de Autónoma de Baja California.

Es de felicitar a los coordinadores de los Congresos Internacionales por haber logrado concretar un programa tan acertado, con la participación de tan importantes autoridades internacionales en la materia. El Instituto Tecnológico de Sonora a través de sus coordinadores, les expresa a todos los autores, organizadores, autoridades, industriales su felicitación por el evento y desea que las conclusiones que aquí se hayan logrado trasciendan las fronteras para que puedan servir de motivación a otros países que se enfrentan a una problemática similar.

José Antonio MEDINA
Presidente de la International Desalination Association
Madrid, España.

PREFACIO

Esta obra conjunta de prestigiados investigadores y científicos nacionales y extranjeros, contiene cuestiones y planteamientos interesantes en materia de desalación. No se refiere a un tema imperceptible por gobiernos y autoridades encargados del manejo de agua, ni a una mera especulación jurídica o ambiental, se refiere a principios de vulnerabilidad y de soluciones tripartitas por parte de gobierno, institutos de educación/investigación y el sector industrial privado. Por ello, el lector debe entender y disfrutar página por página o párrafo por párrafo, pues no solo plantea problemas y enigmas jurídicos y científicos, sino axiológicos y de filosofía de la vida o de modelos y paradigmas socioeconómicos que son puestos implacablemente en la problemática del día a día en los problemas actuales y futuros por el recurso hídrico.

Este libro tiene, así, un valor multifuncional. Hace planteamientos que se hicieron durante los 2 congresos internacionales sobre Desalación de Agua con Energías Renovables, en donde intervinieron especialistas nacionales y extranjeros de diferentes disciplinas científicas: ingenieros, economistas, investigadores, profesores y oceanólogos.

Organizado por el Instituto Tecnológico de Sonora como parte del Programa de Investigación Multidisciplinaria, impulsado por el: Centro Regional de Investigación y Desarrollo del Agua y la Energía (CRIDAE). Es pues, al mismo tiempo, una obra del Instituto Tecnológico de Sonora que cumple con su cometido científico, ejemplarmente para investigación y difusión ante entes gubernamentales, organismos operadores de agua.

Esperamos que esta obra literaria sirva de ejemplo y traspase fronteras en su consulta técnica, informativa y de consultaría ante diferentes escenarios actuales de déficit en que coexiste el recurso hídrico y sus necesidades urgentes de establecer mecanismos y soluciones factibles, tangibles y de alto impacto social, a la cual nos debemos y necesita de profesionales en el ramo de la desalinización de agua de mar.

Los Compiladores

CAPÍTULO 1.

DESALACIÓN DE AGUA DE POZOS Y SU EMPLEO EN LA AGRICULTURA, MEDIANTE LA TÉCNICA DE ÓSMOSIS INVERSA

Dévora, G.E.¹, Valdez, L.C.¹, González R.¹, Ramos, U.D.¹, Astorga, S.², Mercado,
M.E.²,

¹ german.devora@itson.edu.mx, luis.valdez@itson.edu.mx,
rodrigo.gonzalez@itson.edu.mx

Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de
Sonora, Cd Obregón-Sonora, México. Tel: +52 -410 90 00 Ext. 1716

² sebas_astorga@hotmail.com, marielena_127@hotmail.com

Estudiante de Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Sonora, Cd Obregón-
Sonora, México.

SUMARIO: I. Introducción, II. Materiales y Métodos, III. Resultados, IV. Discusión,
V. Conclusiones, VI. Referencias

Resumen

Los problemas de disponibilidad de los recursos hídricos abandonados en el Valle del Yaqui se deben principalmente a la alta concentración de sales en los pozos. La utilización de tecnologías de desalación permite revertir ese efecto. El pozo utilizado en este estudio tiene una concentración promedio de 9,900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ causando daños en las propiedades del suelo y al desarrollo vegetativo del cultivo sorgo, cómo la germinación (panojas/ m^2), altura (m), grosor de tallo (cm) y rendimiento (Ton/Ha). Se habilitó una planta desaladora de 100 m^3/d para acondicionar el agua del pozo, integrando cintas de riego para la optimización del agua proveniente de la planta. Esta agua producto utilizada fue de 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se utilizó equipo electrónico Watermak 200 para medir la retención de agua en el suelo en busca de la programación del riego. Los resultados del estudio muestran que el costo de producción de agua es de 6.05 $\$/\text{m}^3$, muy similar a lo reportado por la International Desalination Association, que es de 6.70 $\$/\text{m}^3$. Con el uso de esta agua desalinizada, se logró un incremento de producción de 1 Ton/Ha comparado al riego con agua salada, sin afectar las propiedades fisicoquímicas del suelo. Este costo hace pensar satisfactoriamente en una estrategia favorable para el uso del recurso hídrico en pozos abandonados en el Valle del Yaqui, en todo el Estado de Sonora y en

estados de México con problemática semejante, que deseen utilizar granos para alimentación o biocombustibles.

Palabras Clave: Biocombustible, desalación, agricultura, agua

Abstract

The availability issues of abandoned water resources in Valle del Yaqui are the result of high levels of salts in the wells. The application of desalination technology is one of the options to minimize this effect. In this research, a well with average concentration of 9,900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ was used, noting that this property causes soil damage and affects vegetative development of sorghum, including germination (panicles/ m^2), height (m), stem thickness (cm) and performance (Ton/Ha). A desalination plant of 100 m^3/d was enabled to improve the quality of the well's water, along with irrigation tapes to optimize the water consumption. The product water from the plant had a concentration of 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Watermark 200 was used to measure the soil moisture and schedule the irrigation program. The results of the research show that the cost of water production was 6.05 $\$/\text{m}^3$, very similar to the one reported by the International Desalination Association, which is 6.70 $\$/\text{m}^3$. Using this technology, the performance of cultivation of sorghum increased 1 Ton/Ha compared to the irrigation with brackish water, with no effects on the physicochemical properties of the soil. The cost of production leads to the conclusion that this strategy is viable to manage the water resources in abandoned wells in Valle del Yaqui, the whole Sonora state and in other states of Mexico with a similar issue, and the purpose of using grains to human feeding and biofuels.

Key Words: Biofuel, desalination, agriculture, water

I. Introducción

En México existe una escasez crónica y aguda de agua sobre todo en la parte norte del territorio nacional, donde la cantidad de la precipitación es mucho menor que la evapotranspiración potencial (Jürgen, 2000). En el Estado de Sonora, principalmente en la región suroeste, 450 pozos agrícolas han sido abandonados debido su alta salinidad, causada por intrusión salina por su cercanía a la costa. Esto obligó a buscar otras fuentes de abastecimiento de agua dulce, entre ellas la desalinización de agua por Ósmosis Inversa (ICGSA, 2007).

Otro reto importante que tiene la desalación es la disminución de costos energéticos de producción, ya que a pesar de ser viable esta tecnología, el costo final de producir agua en estándar de calidad es aún elevado, y el uso de granos con fines de generación de energía mediante biocombustibles se vislumbra como una alternativa para bajar el costo de producción (Huang *et al.*, 2009). El sorgo, quinto cereal en importancia en el mundo tras el arroz, maíz, trigo y cebada, crece en terrenos secos, tolera bien el calor, un alto porcentaje de humedad o la salinidad del suelo (Dar, 2008). En México se encuentran ya cada vez más establecidas las condiciones legislativas, energéticas y de mercado que alienten la construcción de biorefinerías. El uso de sorgo como materia prima para la producción de alternativas a la gasolina resulta sin duda una de las áreas más promisorias en el campo y la industria nacional (Chuck, 2011). Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo es rehabilitar un pozo agrícola salobre a través de la instalación una planta desaladora de Osmosis Inversa, para cultivar plantas con propiedades bioenergéticas. Con el uso de desalación, los productores no se preocuparán por sembrar cultivos que soporten o toleren la concentración de sus pozos, ya que podrán establecer siembras de alto rendimiento y valor comercial (Dévora, 2007).

II. Materiales y Métodos

El experimento consistió en la selección de un terreno agrícola con problemas de salinidad en su pozo de alimentación, que estuviera abandonado. Se habilitó una planta desaladora de Ósmosis Inversa de 100 m³/d con el cual se regó sorgo de la variedad Ámbar de ASGROW porque se procuró utilizar un material vegetal resistente a altas concentraciones de sal debido a la finalidad del proyecto de utilizar agua salada (9,900 μ S/cm) y desalada (150 μ S/cm). Ya seleccionado el cultivo, este se sembró el día 26 de abril del 2013, posteriormente se aplicó un riego pesado de alrededor de 8 horas para asegurar una germinación adecuada de la semilla. Por otra parte, se establecieron riegos

de alrededor de 1.5 horas 3 veces por semana en el mes de abril y mayo de 2013. Cuando la demanda evaporativa fue más alta como sucedió en el mes de julio la frecuencia de los riegos aumentaron de 3 a 6 veces por semana con 2 horas promedio por riego.

Se instaló equipo de medición para el control del proceso, como sensores electrónicos (watermak 200) y tensiómetros manuales para monitorear la humedad del suelo y en base a ello se determinó el momento de riego y duración del mismo. Estos instrumentos se colocaron en el cultivo de sorgo 3 por tratamiento. La profundidad de instalación de sensores fue de 15 centímetros para sorgo. Se procedió a cosechar el sorgo el día 15 de Agosto de 2013 para determinar el rendimiento final por tratamiento evaluado. Las muestras en sorgo tuvieron un área de 16 m², tomando 6 muestras para el tratamiento regado con agua del pozo y 6 muestras para el regado con agua de la planta. Al finalizar el muestreo se procedió a la medición de parámetros fisiológicos finales en sorgo, como fueron la altura final de la planta, el tamaño y peso de la panoja. La diferencia de días se debió a los impactos ocasionados por las lluvias presentadas.

III. Resultados

Operación de planta desaladora

El uso de la planta desaladora en este estudio propicio, como se ha mencionado anteriormente, el acondicionamiento de un cuerpo de agua salobre para su uso en riego de cultivos, caso específico del sorgo. En la Tabla 1 se muestra la caracterización hecha al agua de alimentación proveniente del pozo, el agua producto de la desalinización y el agua rechazo o salmuera obtenida del proceso.

Tabla 1.

Caracterización de las corrientes de agua en la planta desaladora

Muestra	pH	CE mg/L	ppm (mg/L)								RAS	PSI
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ ⁼	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁼	Cl ⁻		
Alimentación	7.01	4,180.0	12.00	16.00	0.10	0.10	0.00	13.20	17.65	22.50	1.71	1.25
Producto	5.16	25.8	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.32	0.43	0.08	0.00	0.00
Rechazo	7.65	10,130.0	30.00	30.00	45.00	0.40	0.00	36.00	45.65	61.00	8.22	9.79

Costos de producción de agua

A lo largo del estudio se tomaron en cuenta todos los factores económicos que intervienen en el proceso de desalinización de agua, ya que se considera fundamental el análisis de costos de producción para determinar la viabilidad de esta tecnología en la situación presente. Los resultados de costos de producción de agua se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.

Costos de producción de agua con cambios proyectados

Concepto	Costo (\$/m ³)
Costo energético	3.78
Importe unitario M.O.	1.73
Importe unitario Químicos	0.08
Importe del mantenimiento	0.57
Total	6.05

Análisis de cultivo

Dejando de lado el análisis técnico del agua, uno de los propósitos fundamentales del estudio era evaluar el comportamiento de la planta de sorgo al ser regada por agua salobre y por la obtenida mediante la planta. En la Figura 1 se observa el comportamiento de la altura del cultivo en los dos módulos de experimentación, desde el mes de abril hasta el mes de septiembre, periodo en que se realizó la toma de mediciones.

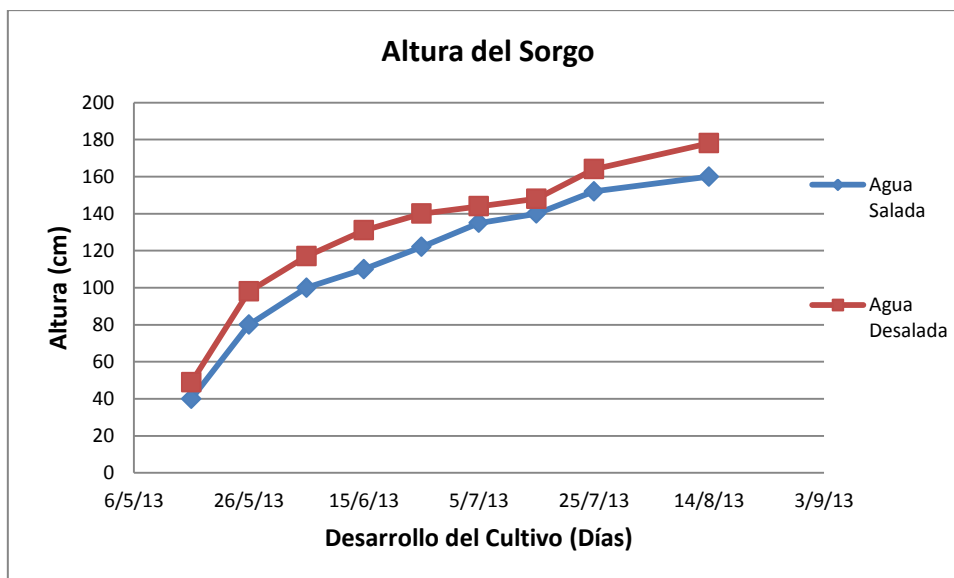


Figura 1. Comportamiento de altura de sorgo en los dos experimentos

En la Tabla 3 se muestra el comportamiento del cultivo de sorgo para cada experimento, en donde se puede observar que el rendimiento final fue mayor en el tratamiento regado con agua desalada proveniente de la planta con una concentración de $150 \mu\text{S/cm}$, alcanzando 8.8 ton/ha promedio comparado contra 7.9 ton/ha del tratamiento regado con agua directa del pozo con concentración de $9,900 \mu\text{S/cm}$. En un análisis realizado utilizando el paquete estadístico Statgraphics 5.0 se determina que no hay diferencias estadísticamente significativas entre cada tratamiento con un 95% de confianza.

Tabla 3.

Comportamiento de parámetros en el cultivo de sorgo

Parámetro	Riego con agua desalada	Riego con agua salobre	α 95 %
Altura (m)	1.70	1.57	X
# panojas/m ²	29.00	28.00	
Peso/panoja (g)	30.00	29.00	
Rendimiento (Ton/Ha)	8.80	7.90	

Propiedades del Suelo

La aplicación de dos tipos de agua en el riego de sorgo tiene un efecto directo en las propiedades fisicoquímicas del mismo. Este efecto puede ser positivo o negativo dependiendo de la perspectiva que se observe (agua salada o desalada). En la Tabla 4 se ejemplifican los valores medidos de las propiedades fisicoquímicas del suelo antes y después de la realización del experimento.

Tabla 4.

Propiedades fisicoquímicas del suelo antes y después del experimento

Muestra	pH Inicial	pH Final	CE Inicial μS/cm	CE Final μS/cm	(meq/L)				RAS Inicial	RAS Final	PSI Inicial	PSI Final
					Na ⁺ Inicial	Na ⁺ Final	Cl ⁻ Inicial	Cl ⁻ Final				
<i>Agua Desalada</i>												
1	7.22	7.08	4,060	3,780	4.50	4.00	16.56	15.20	1.27	1.21	0.63	0.61
2	7.48	7.48	2,340	2,040	7.80	6.90	3.00	2.60	3.18	1.80	3.32	1.80
3	7.14	7.25	2,040	2,010	4.40	30.00	9.00	133.00	3.65	3.96	0.90	3.96
4	7.25	7.28	2,830	2,370	3.90	8.20	12.50	17.00	1.71	1.25	0.30	1.25
<i>Agua Salada</i>												
5	7.05	7.35	2,590	11,690	2.30	30.00	12.50	30.00	0.68	2.09	0.00	1.79
6	7.43	7.47	3,180	12,190	4.60	30.00	16.00	103.00	1.25	4.05	0.58	5.25
7	7.48	7.23	2,340	13,900	1.80	13.20	18.00	101.00	0.58	4.01	0.00	4.10
8	7.23	7.48	2,730	12,040	7.80	31.40	13.50	122.00	2.18	3.75	1.92	4.45

IV. Discusión

En los resultados obtenidos, se observa que la eficiencia de remoción de cationes y aniones de la planta desaladora es muy cercana al 100%, y la eficiencia en remoción de concentración de sales es de 99.39%, lo que indica que el agua producto del sistema usada para riego es de una calidad totalmente superior a la del agua de pozo.

Es claro que tal eficiencia de remoción significa un costo de producción, también ejemplificado en tablas anteriores, que fue de 6.05 \$/m³, siendo menor al reportado por otros autores, que es de 6.70 \$/m³. Este costo representa un resultado significativo a favor del estudio, ya que puede ser un punto de

inflexión para comprobar la viabilidad de este proceso en agricultura, especialmente en el cultivo de sorgo.

En cuanto a los resultados directos del proceso de cultivo de sorgo, es perfectamente notable el mayor rendimiento y salud propiciado por el riego con agua desalinizada que con agua salada, obteniendo una altura mayor de 15 cm en promedio y 1 Ton/Ha más como rendimiento en la cosecha, causado por la alta calidad y baja concentración en sales con las que cuenta el agua, permitiendo un desarrollo fisiológico favorable del cultivo.

Se observa, en última instancia, el beneficio que tiene el uso de agua desalinizada en las propiedades del suelo que hacen posible la actividad agrícola, ya que de seguir usando agua con alto contenido en sales, la calidad y productividad de la tierra en uso se verá demeritada en cada ciclo agrícola.

V. Conclusiones

Sin lugar a duda la optimización del recurso mediante sensores y equipo sofisticado de control permitirá que se utilice solo el agua necesaria durante el cultivo de granos favoreciendo el crecimiento económico y el acceso a los alimentos de los países en desarrollo. Por causa-efecto se incrementó la productividad agrícola y las inversiones públicas y privadas en el sector rural se ven viables en el corto plazo. La transferencia de tecnología es vital para proyectos innovadores que vengán a solucionar el desabasto de agua en México, sin duda el implementar tecnología de desalación y técnicas e instrumentación de monitoreo, permite mejorar la rentabilidad del cultivo, reducción de costos, utilización en el sector de biocombustibles y el aprovechamiento del recurso hídrico abandonado y sin uso benéfico a la sociedad.

Agradecimientos

Se agradece a Fundación Produce Sonora, por el apoyo recibido para la ejecución del proyecto: Tecnología sobre desalación de agua en pozos con problemas de intrusión salina, para su reutilización en la agricultura; según convocatoria 26-2012-0030.

VI. Referencias

- Chuck, C., *et al.*. (2011). Sorgo como un cultivo multifacético para la producción de bioetanol en México: Tecnologías, avances y áreas de oportunidad. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* [online], 10 (3): 529-549. ISSN 1665-2738.
- Dar, W. (2008). *Innovations for a changing world*. ICRISAT Annual Report. 16-19.
- Dévora, G. E., & González, R. (2007). *Desalinización de agua de mar, una estrategia para detonar el desarrollo del Noroeste de México. Los acuíferos Costeros: Retos y Soluciones*. 1, 1025-1034.
- Huang G., Chen, F., Wei, D., Zhang, X., & Chen, G. (2009). *Biodiesel production by Microalgal Biotechnology*. *Science and Technology*, 87 (1), 38-46.
- ICGSA (Ingenieros Civiles y Geólogos S.A.). (2007). *Estudio geohidrológico para el Valle Aluvial del Rio Yaqui*. Sonora, ICGSA-SARG.
- Jürgen, H. (2000). Técnicas innovativas de desalinización de aguas salobres y del mar. *Ciencia y conciencia compromiso nacional con el medio ambiente: Memorias Técnicas*. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias ambientales., AIDIS. México, D.F.14-18 Agosto 2000. 1-11.

CAPÍTULO 2.

EL ESTADO ACTUAL DE LA DESALACIÓN EN EL MUNDO Y SU PROYECCIÓN EN EL FUTURO.

José Antonio Medina San Juan

MED desalación

C/ Moratines, 9 - 5º C

Tel/Fax: +34 91 4740654

28005 Madrid

SUMARIO: I. *Introducción*, II. *Situación Mundial*, III. *Tecnologías de Desalación*, IV. *Mejoras obtenidas en la Desalación*, V. *El futuro de la Desalación*

I. Introducción

Los recursos hídricos naturales o convencionales están sometidos a una fuerte presión e numerosos 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 última siempre representa un porcentaje importante superior al 70% de la demanda
- Pérdidas de agua en redes o servicios, que son mayores en tanto en cuanto aumenta esa demanda
- Contaminación de los recursos existentes por la agricultura, la industria o los usos humanos
- Cambios en las condiciones meteorológicas o ambientales

Esta presión lleva en muchos casos a una escasez frente a la que los gobiernos o instituciones toman tradicionalmente medidas tendentes en primer lugar a aumentar los recursos naturales o convencionales, a aumentar la eficiencia de los usos en cierta medida y cuando ya ambas opciones se tornan insuficientes, se recurre a otros recursos los no convencionales, que son recursos que existen pero que no son utilizables en su forma natural y requieren del uso de la tecnología para poder incorporarlos a la oferta de agua.

Entre estos recursos no convencionales podemos citar, por encima de otros la desalación de aguas salobres y de mar y en un segundo nivel la reutilización.

Las Instituciones y responsables de los problemas de agua en las regiones o municipios, en ese primer intento de buscar los recursos naturales se encuentran con que tanto los recursos superficiales como los subterráneos no son tan abundantes como creían y/o no son tan baratos como se esperaba.

El coste de construir nuevas presas ha aumentado porque no solo el precio de los trabajos así lo ha hecho, sino porque los mejores lugares ya han sido ocupados y por tanto los nuevos posibles emplazamientos presentan más dificultades de construcción, están más alejados de los puntos de demanda, o regulan volúmenes cada vez menores por su dependencia de la climatología. Como ejemplo de esta situación tenemos la isla de Gran Canaria con más de 60 grandes presas y con un volumen regulado en torno al 12% que es inferior al volumen producido por las plantas desaladoras existentes en la isla.

Pero es que los pozos son sobreexplotados y ello conlleva una reducción de los caudales y una pérdida de la calidad que aboca a una profundización de los mismos, a un encarecimiento de los costes de extracción, y a un aumento de la salinidad que solo puede resolverse mediante la eliminación parcial de esas sales y esto también supone un incremento de los costes.

Pero a esos problemas técnicos o económicos para incrementar los recursos naturales se añaden con cada vez más frecuencia problemas sociales,

con los que hace unos años no se contaba. Es el caso de recursos de los ríos, lagos o embalses compartidos entre estrados, provincias o países, sobre los que se establecen derechos de propiedad de unos entes sobre otros y que impiden en muchos casos un aprovechamiento más racional de los mismos, por los que pudieran utilizarlos mejor, es decir más eficientemente y más rentablemente en la creación de riqueza, sin por ello quitar a los anteriores posibilidades o derechos de utilización.

Y cuando ya lo que se pretende es que los recursos de una de esas organizaciones administrativas vayan a parar a otras la situación se hace insostenible y se recurre a todo tipo de argucias.

En muchos casos los condicionantes políticos son tan importantes que priman sobre cualquier otro criterio.

Pero por si todo eso no fuera suficiente añadamos los condicionantes medioambientales, que hace unos años no existían, y que en la actualidad y sin argumentos verdaderamente sólidos en la mayoría de los casos, se han llevado a extremos tan peligrosos o perniciosos para la sociedad, porque todo eso tiene un coste, como sería el no tomar ninguna precaución.

Frente a esto el coste de obtención de recursos no convencionales ha disminuido de forma notable hasta el punto que en muchas ocasiones puede ser comparado ventajosamente con el de los otros recursos, y ello se debe a un cambio en las tecnologías, una reducción de los costes energéticos, el aumento de la competitividad y la mayor fiabilidad lograda.

Por esto la desalación se contempla en muchos lugares del mundo como una esperanza para una vida mejor, pues su desarrollo depende de la disponibilidad de agua y la tecnología de desalación para aguas salobres o de mar ha progresado en los últimos 5 a 10 años hasta unos niveles de eficiencia y costes que permiten su utilización en sectores en los que hasta hace poco tiempo inimaginables.

Desalar es el proceso de eliminar las sales o dicho de otra forma los elementos inorgánicos o iones del líquido que los contiene, generalmente el agua.

Por tanto la desalación es la tecnología que se utiliza para conseguir ese proceso de separación de sales.

Se trata de una tecnología que viene siendo ampliamente utilizada desde hace años, tanto en la industria como en la agricultura o en el abastecimiento, aunque quizás solamente la relacione la mayoría de las personas con la desalación del agua de mar, y especialmente con los países desérticos del Golfo Pérsico.

Y en efecto, al tener una gran escasez de agua y abundancia de petróleo y por tanto energía barata, hace más de 40 años que en ellos se instalaron y perfeccionaron algunas de las tecnologías de desalación que durante tres cuartas partes del siglo pasado se mantuvieron como las referencias tecnológicas del sector, pero que poco a poco han ido dando paso a otras tecnologías surgidas en el último cuarto del citado siglo y que se presentan como el gran reto del siglo XXI, que puede ayudar a resolver numerosos problemas de falta de agua.

No debemos olvidar que ya en la actualidad se considera que al menos 60 millones de seres encaran serios problemas de escasez de agua y que según el Banco Mundial en los próximos 25 años dicha cifra puede alcanzar hasta los 200 millones y también que al menos en un 70% de los casos dichos problemas ocurren en países ribereños, y que por tanto tienen una fuente inagotable de agua como es el mar, si bien de una calidad que la hace inapropiada para la totalidad de los usos del ser humano.

Por tanto si existe el depósito que puede suministrar el agua y existe también la tecnología capaz de convertir el agua de mar en agua potable o útil

para distintos usos, parece que es cuestión de tiempo el que esa tecnología pueda ser utilizada en mayor escala de lo que lo es actualmente.

El proceso de desalación es como todo proceso industrial dependiente de la energía y es fundamentalmente la escasez de esta y su elevado precio la que hace que todavía no pueda ser utilizada la desalación para cubrir cualquier situación de escasez o falta de agua, puesto que los mayores costos de las tecnologías de desalación son precisamente los derivados del consumo de energía. Y ello ocurre a pesar de que en los últimos 25 años las tecnologías de desalación han evolucionado en el consumo energético, de forma que este se ha reducido a un 20 o 25 %, puesto que las desaladoras actuales son evidentemente mucho más eficientes energéticamente que las de hace unos años.

Por todo lo dicho se entiende que la desalación reúne frente a los recursos convencionales una serie de ventajas como:

- Ser un recurso seguro
- Localización cercana al consumo
- Recurso nuevo y no sometido a condicionantes de propiedad previos
- Más rápidamente disponible
- Menos tiempo de construcción
- Menos problemas medioambientales
- Menos problemas sociales

Pero que para su utilización hay que tener en cuenta también que reúne ciertas desventajas como:

- Más caros que otros sistemas, aunque las diferencias se acortan
- Requiere más cuidados en la explotación
- El consumo energético puede ser superior
- Se precisa de personal más cualificado
- No se aprovecha toda el agua disponible
- Puede producir contaminaciones

II. Situación Mundial

Cuando en Enero de 1990 se pone en marcha Las Palmas III, la mayor planta desaladora del mundo con membranas en ese momento, se rompe un poco lo que hasta entonces había sido la norma en la tecnología de plantas desaladoras y representa realmente la ruptura con el pasado.

De un dominio aplastante de las tecnologías de destilación, centradas en el Golfo Pérsico y solo plantas desaladoras de membranas de agua salobre de pequeñas capacidades repartidas por el mundo y con muchos ejemplos en Usa y sobre todo en el estado de Florida, se empieza a pensar que las membranas pueden suponer un avance y una reducción de costes para hacer la desalación más asequible a los consumidores.

La puesta en marcha de aquella planta supone bajar el consumo energético de los 15 – 17 kWh/m³ que eran normales con las otras tecnologías hasta menos de la mitad.

Las aplicaciones de la desalación se han ido extendiendo posteriormente no solo a los suministros urbanos, turísticos o industriales, sino incluso a la agricultura, lo que abre nuevas perspectivas de uso de las modernas tecnologías en sectores hace poco impensables.

Por ejemplo en Libia, con una notable capacidad desaladora instalada y donde se proyectan nuevas plantas, pero donde no es el único recurso excepcional, compitiendo con los más de 3.500 km de tuberías de 4 m de diámetro, instaladas para traer el agua desde un acuífero del interior del desierto hacia la costa.

Y también en Arabia Saudita como otro importante ejemplo de uso de la desalación, el mayor del mundo con casi 6 Mm³/d de producción de agua desalada, aquí las condiciones son distintas pues se trata de un país desértico que es el primer productor mundial de petróleo con 9 Millones de barriles/d y donde desde hace años existe el equivalente a un Ministerio para la desalación (SWCC).

Pero también se recurrió anteriormente a aguas superficiales y subterráneas y cuando estas fueron empeorando su calidad se desalaron y se recurrió al agua de mar.

Como curiosidad la ciudad de Ryad que está a 600 km del mar y a 450 m de altura, recibe diariamente más de 1 millón de m³ de agua desalada desde Al Jubail, siendo el coste real de impulsión del agua casi tan elevado como el de desalar.

Pero se sigue investigando y buscando nuevos recursos naturales y así el Profesor Faruk El Baz de la Universidad de Massachussets pronostica la existencia de grandes depósitos de agua bajo las arenas del desierto, en lo que hoy se conoce como empty quartet, según una teoría bastante particular. Sin embargo la adjudicación reciente de permisos de exploraciones petrolíferas en esta zona, a empresas de todo el mundo, pueden confirmar en cierta medida las previsiones de El Baz, dada la gran relación que suele existir entre la existencia de agua, generalmente salobre, y petróleo.

También tenemos en Estados Unidos dos ejemplos singulares sobre aplicación de la desalación, la desaladora de Yuma de 300.000 m³/día que se construyó hace unos 20 años y que nunca llegó a funcionar, pero cuyo objeto era desalar las aguas del río Colorado, que como consecuencia de los retornos de los regadíos de la zona, llegaba a México en unas condiciones poco apropiadas para su uso. Quizás no fuera un proyecto muy acertado en su momento, ya que nunca llegó a funcionar aunque ahora se está retomando de nuevo dado que se construyó una infraestructura muy cara que se quiere rehabilitar.

Otra desaladora en Brockton, cerca de Boston, va a desalar agua del río Taunton para varios municipios y las conducciones tienen que atravesar y ser aceptadas por unos y otros.

Singapur es otro ejemplo de uso de tecnología de desalación para romper su dependencia respecto al suministro de agua de otro país, Malasia desde el

que recibe agua a través de una tubería, suministro sobre el que existe un acuerdo.

Y en este breve relato hemos hablado de desaladoras de todo tipo, desde las de vapor de los países árabes hasta las más usuales y sobre todo entre nosotros de ósmosis inversa.

Pero para poder hablar un poco del futuro tenemos que analizar lo que ha ocurrido en el mundo de la tecnología, y lo primero que podemos preguntarnos es qué ha pasado con los sistemas de destilación, que ya entre nosotros y en muchos lugares han quedado descartados.

A lo largo de los años se han producido algunos avances, pero no tan importantes como con la tecnología de membranas y así se consiguió pasar de 18 kWh/m³ equivalentes hasta 13 en grandes plantas y a 11 en pequeñas de VC.

Pero es que además aquellas plantas eran también mucho más caras en inversión y con la subida de las materias primas a nivel mundial y en concreto del acero que es la base de estas instalaciones los precios se han disparado y en solo tres años ha habido un incremento en torno al 30 % en la inversión..

Pero como hemos visto al hablar de consumo energético, tampoco han mejorado las prestaciones de estas plantas, aunque el paso de MSF a MED ha significado algún pequeño avance.

Por esto hace unos 4 años se puso en marcha un proyecto para construir en vertical y en torre de hormigón una desaladora de evaporación en Los Ángeles, que fue abandonado dos años después. Y al final solo se ha ido a una reducción de los costes de instalación aumentando el tamaño de las instalaciones y mejorando el cálculo de espesores mediante la aplicación de elementos finitos. Así se ha pasado de 20,000 m³/d por módulo hasta 50,000 m³/d.

Pero poco más... y sin embargo estas plantas no han desaparecido todavía, sino que al contrario empiezan a vivir otra época dorada, aunque

espero que sea de corta duración, pues son mucho menos eficientes energéticamente y más contaminantes.

Los nuevos proyectos privados de Arabia Saudita con capacidades superiores a los 500,000 m³/d están basados en estas tecnologías, frente a la osmosis inversa que no avanza al mismo ritmo en ese país.

Y lo mismo pasa en Libia, donde a las autoridades sigue apostando fuertemente por la construcción de nuevas desaladoras con las tecnologías más antiguas.

Pero en esa región y en la época de guerra fría, siguiente a la 1^o guerra de Irak, se desarrolló un concepto bastante alejado de lo que hoy conocemos como globalidad, que fue la teoría de agua y seguridad, basado en el conocimiento de la operación de los sistemas que tenían y su poca dependencia exterior, mientras tuvieran.....petróleo, y lo tenían. El coste de desalar era lo de menos

Sin embargo Argelia, aprovechando el alza de los precios del petróleo y gas se ha lanzado a un programa de modernización del país, en el que la disponibilidad de agua es fundamental y para ello va a construir instalaciones de desalación de una capacidad total próxima a 2 millones de m³/d, y todas... mediante O.I.

Hemos citado como países potenciales de crecimiento Australia, que el día 18 de Abril inaugura su primera desaladora importante en Perth de 100.000 m³/día, a la que van a seguir hasta seis más, o la India donde la primera desaladora en Chennai se está empezando a construir y supone un hito importante en un país en el que la renta per cápita es muy baja, pero donde la industria y determinados sectores urbanos tienen capacidad para pagar unos precios reales por el agua desalada de calidad.

En Estados Unidos, el cuarto país del mundo en cuanto a capacidad de desalación instalada, pero donde no existía una sola desaladora importante de agua de mar, hasta que se ha puesto en marcha la de Tampa, en California y Texas se van a construir en los próximos años grandes plantas desaladoras

China, Irán y México pueden suponer también una sorpresa para los no conocedores de la situación de esos países, que confrontan además de un clima árido en algunas de sus regiones una elevada población y una industria en pleno desarrollo.

La realización de estas iniciativas en los distintos países se ha realizado de manera muy distinta y así en el Sur de California se ha planificado pasar de una situación de dependencia exterior a través de los acueductos del Norte y del Colorado, a una situación más dependiente de esos recursos generados en la zona mediante la construcción de desaladoras.

En Irán de una política basada exclusivamente en la construcción de presas se ha pasado a promover la construcción de desaladoras en la zona industrial del Sur.

En Túnez se está llevando a cabo una política de mejora de la calidad del agua en las regiones del sur mediante desaladoras de agua salobre que mejoren la situación general en dos etapas, lo que le permitirá conseguir esos recursos económicos de una forma bien planificada.

III. Tecnologías de Desalación

Hemos hecho referencia al desarrollo y los avances que se han producido en estos años en el campo de la desalación y por tanto vamos a decir que existen distintas tecnologías capaces de desalar o separar las sales y que en todas ellas se han producido avances, si bien la propia naturaleza de los procesos que se emplean para realizar la separación hace que las posibilidades y los avances sean muy distintos en unas que en otras.

Los primeros sistemas que se emplearon fueron los de evaporación, en los que se reproduce de una manera más eficiente la evaporación primero del agua y su posterior condensación, recogándose el agua libre de sales.

Estos sistemas conocidos como MSF, MED y CV fueron los pioneros en el campo de la desalación y tras sucesivas mejoras pasaron de consumir más de 20 kWh/m³ hace 25 años a 8 kWh/m³ con los últimos avances.

Sin embargo el problema que han tenido todos ellos es que además del gran volumen que ocupan y su complejidad que hace que las inversiones sean también muy elevadas, a partir de los años 70 se empiezan a desarrollar 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 hasta el punto que ya los avances más recientes permiten desalar agua de mar con un consumo inferior a los 3 kWh/m³ y aguas salobres con consumos inferiores a 1 kWh/m³. De forma que rápidamente las tecnologías de vapor dejaron de aplicarse al agua salobre puesto que su consumo energético es prácticamente igual que para el agua de mar, siendo sustituidas por la EDR y O.I. que son las dos tecnologías de membranas a las que hacemos referencia, y ese mismo parece ser su destino en cuanto al agua de mar, siendo sustituidas por la ósmosis inversa, al menos en países como el nuestro en los que carecemos de combustibles fósiles.

IV. Mejoras Obtenidas en la Desalación

Se han obtenido en base a

- La sustitución de las viejas tecnologías de evaporación por las de membranas mucho más eficientes energéticamente
- La utilización de diseños que se han centrado principalmente en la reducción de los consumos energéticos y que han sido posibles gracias
 - Las mejoras conseguidas en la fabricación de membranas
 - La aplicación de alta tecnología a los equipos mecánicos que han aumentado su eficiencia
 - la aparición de nuevos equipos de recuperación de energía, o la mejora de los existentes

- o la utilización de la electrónica en el control y automatización de las instalaciones

Gracias a ello se han conseguido importantes ahorros energéticos como aparecen en el siguiente cuadro:

Tabla 1.
Evolución de los consumos energéticos

Año	kWh/m³	Euros/m³
1970	22.0	2.103
1980	18.0	1.803
1985	15.0	1.112
1988	13.0	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

Esta evolución técnica queda reflejada en los siguientes hitos:

- Todas las plantas de O.I. Con equipos de recuperación de energía
- 1,986. HPP y bombas invertidas
- 1,986. Membranas de fibra hueca
- 1,990. Membranas de agua de mar y dos etapas(6 mem/tub
- 1,993. Membranas de agua de mar en una etapa(7 mem/tub)
- 1,996. HPP y Turbinas Calder
- 2,000. HPP e Intercambiadores de presión (plantas pequeñas)
- 2,002. Concentradores de salmuera

Sin embargo en la búsqueda de soluciones a la desalación se están produciendo contradicciones importantes y es que a los esfuerzos tecnológicos que con el fin de abaratar la desalación para hacerla más asequible a muchos países que necesitan de ella se están realizando:

- Aumento de la eficiencia
- Reducción de emisiones
- Cuidado con los vertidos
- Reducción de costes

Se enfrentan:

- Oposición social medioambiental
- Permisos medioambientales dispares según países, o incluso dentro de distintas regiones o estados de un mismo país.
 - Exigencias no razonables
- Falta de flexibilidad administrativa
 - Decisiones equivocadas o influenciadas que no pueden cambiarse
- Protección extrema de la salud pública que aumenta las dificultades
 - Exigencias en cuanto a contenidos de sales totales o parciales sin argumentos de peso

Que en definitiva contribuyen a encarecer la obtención de agua desalada. Solo de esta manera puede explicarse que en California el grupo Poseidon haya gastado más de 10 millones de dólares y cuatro o cinco años para resolver permisos, en su mayoría medioambientales, y que no están totalmente conseguidos en la actualidad, para construir una planta de 100.000 m³/día, o que en otro proyecto en Massachussets, un grupo español para poner en marcha también un proyecto de desalación en el río Tauton, lleve tres años de gestiones, haya tenido que resolver 21 permisos y gastar 4 millones de dólares, y todo eso para apenas 12,000 m³/d.

V. El Futuro de la Desalación

La adopción de la tecnología de desalación para resolver problemas de escasez de agua es un hecho imparables, puesto que se ofrece como la única alternativa a los recursos naturales que escasean o se contaminan por el uso.

Pero su aceptación está todavía sometida a una serie de condicionantes que tienen que ver con la tecnología y la economía.

Respecto a la tecnología los avances para la reducción de costes en los procesos térmicos no han sido tan espectaculares como en el campo de las membranas, pero aun así

En los costes de Inversión y operación se han mejorado mediante

- Aumento de la capacidad de las unidades
- Reducción de costes de operación.
 - Automatización.
- Reducción en el número de equipos

Y tecnológicamente a través de

- Nuevos diseños matemáticos
- Aumento de la recuperación
- Temperaturas más elevadas
- Anti-incrustantes específicos
- Temperaturas más bajas
- Mejora de la eficiencia de MSF y MED (Falling film, GOR)
- Reducción del consumo energético
 - Aumento de la eficiencia de los equipos
- Bombas
- Nuevos diseños
 - Uso de membranas de NF como pre-tratamiento

Pero parece que se ha llegado a un límite difícil de mejorar, por lo que su utilización seguirá cada vez más restringida a los países con abundancia de recursos petrolíferos.

Respecto a la osmosis inversa existe todavía margen para la mejora, si bien no serán tan espectaculares como las logradas en los últimos cinco años.

En lo que se refiere a los Costes de Inversión se pueden reducir por

- Aumento de la conversión
- Aumento de la capacidad de la planta
- Reducción del nº de equipos
 - Trenes de mayor capacidad
 - Bombas y turbinas mayores
- Reducción de costes
 - Membranas
 - Bombas más sencillas
 - Bombas menores y recuperadores de presión

Y en lo relativo a la Operación mediante

- Aumento de la conversión
 - Anti-incrustantes específicos
- Reducción costes laborales
 - Automatización
- Reducción del consumo energético
 - Aumento de la eficiencia
- Bombas
- Recuperadores de presión
- Nuevos diseños
 - Aumento producción en 2ª etapa

Esto va a permitir incluso un uso más amplio en la agricultura, donde solo en España la desalación representa una parte importante del total

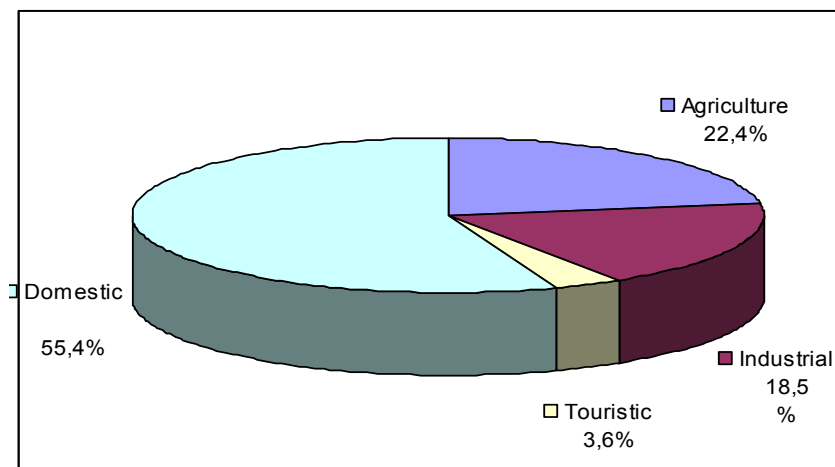


Figura 1. Distribución del uso de agua desalada en España

Pero para regar de forma extensiva con agua desalada será necesario además:

- Emplear las técnicas más eficientes de riego
 - Riego por goteo
 - Riego por aspersión
- Emplear las técnicas más eficientes de cultivo
 - Invernaderos
 - Hidroponía
 - Cultivos muy mecanizados
- Utilizar las semillas más productivas
- Plantar los cultivos más rentables

El futuro de la osmosis inversa debe conquistarse sobre la base de mejoras en los diseños, en los equipos y las membranas, especialmente en estas últimas.

Los principales problemas a los que se enfrentan las membranas en estos momentos son:

- Facilidad de ensuciamiento
- Baja permeabilidad
- Alto Costo
- Consumo energético mejorable

Y las líneas de trabajo van encaminadas a:

- Diámetros mayores pasando de 8" a 16" para reducir los costes de inversión
- Al empleo de la Nanotecnología, que mediante la mezcla de materiales orgánicos + inorgánicos puede lograr.
 - Elevada permoselectividad
 - Resistencia al ensuciamiento
 - Mejora de la selectividad

El precio del agua desalada está en estos momentos estabilizado por debajo del dólar/m³, si bien con variaciones en función de las condiciones económicas en que se realizan los proyectos y que tienen mucho que ver con las garantías que ofrecen a las entidades de crédito los países en los que se van a realizar las inversiones.

En el siguiente cuadro quedan reflejadas las tarifas aplicadas a los principales proyectos de desalación que se está realizando actualmente e le mundo.

Tabla 2.

Tarifas aplicadas en los proyectos de desalación.

Planta	País	Producción m ³ /d	US\$/m ³	Uso
Trinidad	Trinidad- Tobago	109,000	0.710	Industrial y urbano
Taweelah	Abu Dhab, UAE	250,000	0.680 – 0.790	Urbano e industrial
Hamma	Argelia	200,000	0.820 – 0.930	Urbano
Fujairah	Fujairah, UAE	350,000	0.689	Urbano e industrial
Skida	Argelia	100,000	0.739	Urbano
Carboneras	Spain	120,000	0.284	Agricultura
Tampa Bay	Florida-USA	100,000	0.550	Urbano
Campo Cartagena	Spain	145,000	0.350	Agricultura/urbano
Singapur	Singapur	100,000	0.520	Urbano
Beni Saf	Argelia	150,000	0.699	Urbano
Mostaganen	Argelia	100,000	0.729	Urbano
Tlemcen	Argelia	150,000	0.761	Urbano
Cap Djinet	Argelia	100,000	0.727	Urbano
Douada	Argelia	100,000	0.713	Urbano

La importancia que tiene la financiación es creciente y ante la falta de recursos económicos suficientes de los países que precisan desalación se están dando cada vez más posibilidades a la alternativa privada.

Posproyectos independientes de agua, ligados en muchos casos a la energía, están teniendo una gran acogida, incluso en los países económicamente más poderosos de Oriente Medio puesto que permiten:

- La modernización de las infraestructuras de generación de agua y electricidad
- Garantizan la Seguridad del suministro
- No son necesarias inversiones iniciales de los Gobiernos para el desarrollo y construcción de plantas lo que reduce los préstamos directos del Gobierno que pueden ser utilizados para otras necesidades importantes
- Suministro de cantidades fijas de agua y electricidad a costes razonables
- Atracción de un gran número de promotores y contratistas que los hacen competitivos
- Crea oportunidades de inversión para sectores privados internacionales, regionales o locales
- Desplazando al sector privado hacia los servicios públicos, la inversión mejora la eficiencia de la organización privada.

En estas circunstancias no es de extrañar que las cifras de la desalación mundial sean tan importantes como las que se señalan a continuación:

- Capacidad instalada a finales de 2006 40 Mm³/d
- Crecimiento producido en los últimos 5 años 12 % anual
- Crecimiento futuro previsible 13,4 % anual
- Previsiones para el año 2010 64 Mm³/d
- Previsiones para el año 2015 98 Mm³/d
- Dicho crecimiento se realizará principalmente en Arabia Saudita, EUA, China, Argelia, Kuwait, USA, Libia, España, India, Omán, Qatar. Irán y..... ¿también con seguridad en México?

CAPÍTULO 3.

PERSPECTIVAS DE LA DESALACIÓN EN EL NOROESTE MEXICANO Y DISPOSICIÓN DE LAS SALMUERAS.

Felipe Correa Díaz

Facultad de Ciencias Marinas
Km 103 Carr. Tijuana-Ensenada.

Ensenada, CP 22890

Baja California

México.

Tel: 52 646 174 45 70

Fax: 52 646 174 41 03

E-Mail: felipe@uabc.mx

SUMARIO: I. *Introducción*, II. *Costo de la Desalación*,
III. *Descargas y efectos de la Salmuera*,
IV. *Disposición sostenible del agua de rechazo de Desalación*, V. *Referencias*

I. Introducción

La región Noroeste, de México, es una de las zonas más productivas y con una actividad económica favorecida por las condiciones de mercado en la frontera que se refleja en un alto nivel de vida de sus pobladores. El abasto de agua, es un factor que amenaza su desarrollo al ser un recurso sometido a una alta presión por la escasez natural, la sobreexplotación de acuíferos y el incremento de la población.

La evidencia de intrusión salina en varios acuíferos, la reducción de la calidad y la dependencia progresiva de fuentes de abastecimiento alejadas de los principales centros de población indican un patrón de uso del agua, no sustentable.

La Desalación de agua de mar, surge como una fuente alternativa para diversificar las opciones de abastecimiento, reducir la presión a la sobreexplotación de las fuentes naturales y contribuir al desarrollo sustentable de la región.

Las zonas, identificadas, donde la demanda de agua va a superar la disponibilidad en los próximos años y propensas a sufrir crisis por escasez de

agua son; Hermosillo, Guaymas-Empalme-San Carlos y Puerto Peñasco en SONORA, Tijuana-Rosarito y Ensenada en BAJA CALIFORNIA y Cabo San Lucas en BAJA CALIFORNIA SUR.

La desalación por Ósmosis Inversa es el proceso más adecuado para las necesidades, capacidades y condiciones de la región y la alternativa superior para generar desarrollo sustentable en materia de uso de agua. El planteamiento de los parámetros de proceso proyectó un costo estimado de producción de agua desalada de 6.8 pesos por metro cúbico (0,62 dólares, 0,49 Euros/m³) para una planta de 100 LPS, 8,640 m³/d.

Estudios realizados en la Facultad de Ciencias Marinas de la UABC en Ensenada, Baja California indican en bioensayos de toxicidad en gametos de erizo de mar que la dosis letal media, DL₅₀, se encuentra en factores de concentración de salmuera de 1.196 o de 39,980 ppm, respecto al agua de mar normal de la zona de 33,400 ppm.

Aporte de la Desalación al Ciclo Integral del Agua para el Noroeste de México

En el Noroeste de México, las lluvias son escasas, el promedio fluctúa en 100 mm al año, el modelo de explotación de agua que se aplica actualmente es no sustentable y su impacto al medio ambiente es significativo, la necesidad de contar con caudales alternativos para satisfacer el incremento en la demanda de agua en la región amenaza con incrementar el impacto al medio ambiente si se sigue aplicando el mismo modelo. La Desalación surge como una opción viable y sustentable de aporte de caudales alternativos y emergentes que puede reducir la presión, al medio ambiente, que se produce por la sobreexplotación del recurso natural.

La ausencia o presencia de lluvia en la región genera crisis recurrentes, en periodos aproximados de 10 años, de sequías e inundaciones y a este patrón

natural adverso se suma un modelo de explotación del recurso no sustentable que se caracteriza en cada zona por:

- Agotamientos y sobreexplotación de las fuentes locales de agua que genera abatimiento de los acuíferos.
- Intrusión salina en zonas costeras y la reducción de la calidad del agua y daños al medio ambiente.
- Dependencia de agua de zonas remotas que implica la transferencia de grandes caudales de una cuenca donante con los gastos que implica su conducción y los conflictos de intereses entre los usuarios de la zona donante y la de transferencia.

La escasez de un recurso obliga a perfeccionar su administración, cuando se considera la desalación como una alternativa de abasto de agua se llega a un nivel de comprensión de la situación y se aquilata más el valor del agua que su costo, el usar agua desalada promueve un nuevo escenario, se cambia el modelo anterior, que llevó a una crisis o que no pudo prevenirla, por un modelo que asegura el abasto del recurso independiente de las variaciones climáticas, evita conflictos por competencia de uso del recurso entre concesionarios, reduce la sobreexplotación al recurso natural, impulsa y permite consolidar el desarrollo de las principales actividades económicas de cada zona de la región, ya sea por turismo, industria y comercio.

El nuevo ciclo del agua deberá contemplar, en cada una de las ciudades donde se aplique el proceso de Desalación, una mejor eficiencia de distribución y recuperación de costos, también el tratamiento y reuso de las aguas residuales que evite desperdicios de este valioso recurso (figura 1).

En Baja California Sur, la ciudad de Cabo San Lucas va a ser la primera de la región en adoptar este nuevo modelo, la operación de una planta desaladora en el 2007 producirá unos 200 litros de agua por segundo de los que se

beneficiarán una población de unas 40,000 personas con lo que el turístico municipio Mexicano de Cabo de San Lucas acabará con su problema de escasez de agua potable [Inima-OHL. 2004, OOMSAPASLC,. 2003]. La planta que se describe inició operaciones en diciembre del 2006. Esto demuestra que la administración del agua se debe de ejercer por los organismos municipales con prioridades y objetivos locales y no dictados por intereses centralistas.

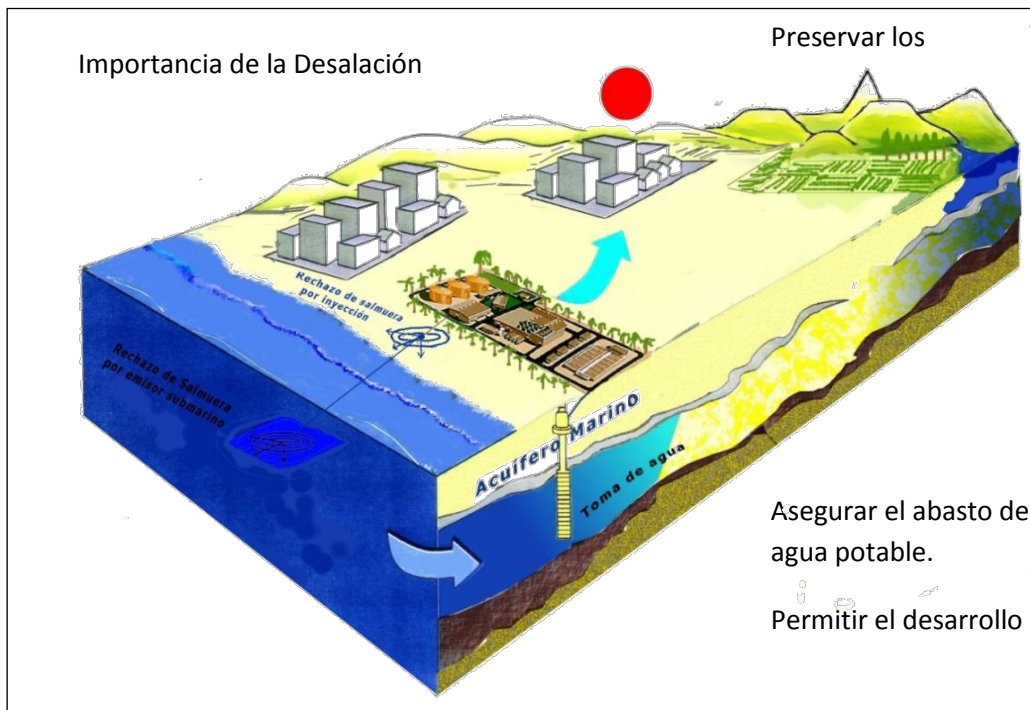


Figura 1. La Desalación en el ciclo integral del agua para el Noroeste de México.

Reseña Histórica de la Aplicación del Proceso de Desalación de Agua de Mar en el Noroeste de México

En 1970 se puso en operación en la Planta Termoeléctrica, Benito Juárez de Rosarito, Baja California, la primer planta desaladora de México y en su tiempo una de las más grandes del mundo, con una capacidad de producción de 320 LPS. (28,350 m³/d). (WDR, 1970). En la década de los 70's, el bajo costo del petróleo impulsó la instalación de desaladoras por destilación pero las siguientes crisis hicieron muy caro la producción de agua por este proceso

además que la construcción del acueducto de Mexicali a Tijuana aportó en su tiempo caudales suficientes y con un costo mucho menor al costo del agua desalada en ese tiempo, aproximadamente de 0.25 USD/l contra 1.75 USD/l por metro cúbico.

De 1970 al 2000 se instalaron pequeñas plantas desaladoras de agua de mar en complejos turísticos y para purificación de agua de red municipal para producción de agua embotellada.

En el 2000 se da un esfuerzo muy importante en el “Proyecto Desaladora para Hermosillo, Sonora” de 2.5 m³/s el cual se detiene después de su evaluación- aprobación técnica y financiera y queda en “estado latente”. [WDR 2001, Zúñiga 2001]

En el 2003 se instala la Desaladora de 11.7 LPS (1,000 m³/d) Maquilas Tetakawi en Guaymas-Empalme uso industrial producción a un costo entre 0.6 y 0.8 USD/l/m³.

2003 Se inicia la redacción del Proyecto de Desaladora de 200 LPS en Cabo San Lucas, Baja California. En operación actualmente.

2004-2005 Evaluación de Alternativas, desaladoras en Ensenada y en Tijuana Baja California. En Guaymas-Empalme y en Puerto Peñasco, Sonora.

2006-2007. Proyectos e instalación de varias plantas desaladoras en Puerto Peñasco, en complejos turísticos.

II. Costo de la Desalación

El ciclo del agua en el estado de Baja California (México) es similar al del sur de California (USA), en esta región hace 10 años el costo del agua desalada era 3000% más alta que el agua de fuentes naturales, en octubre del 2003 la diferencia entre el agua desalada y de fuentes naturales es de un 50% [California Coastal Comisión., 2004]. En 1993 los organismos operadores, en el sur de California pagaban el millar de m³ a 21.91 USD/l (18.25 €) mientras que a finales del 2006 su costo promedio es de 427 (356 €). El costo del m³, al

consumidor de agua potable en San Diego es de 1.05 USDlls, para consumos de unos 36 m³ al mes.

En el noroeste de México la Comisión Nacional del Agua fija una tarifa de 292 pesos (26.5 \$USD, 20.41 euros) por millar de m³, el precio que paga el usuario final por el agua depende de los gastos de energía, infraestructura y eficiencia administrativa del organismo operador que se encargue de proveer el servicio. En Sonora y Baja California Sur el costo que pagan los usuarios finales, por el agua, es mucho menor al valor real de este recurso. En Baja California la recuperación es mayor, por ejemplo en la ciudad de Ensenada, para una familia con un consumo promedio de 33 a 49 metros cúbicos al mes, el costo de agua es de 8.4 a 12.20 pesos por m³, respectivamente (0.66 a 0.95 euros) estos precios nos indican que el costo del agua de fuentes naturales es superior al costo del agua desalada según las estimaciones de la CCC (2003), que publica un precio de producción entre 0.57 y 0.83 USDlls – m³ (0.43-0.63 euros), para la zona del sur de California

De los factores que determinan el costo de la desalación, el consumo de energía es el más importante y hacia él 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. El proceso de ósmosis 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.

Los costos que se aprecian en la figura 2 incluyen los costos de inversión y amortización de las instalaciones y sus costos de operación y mantenimiento, los costos de inversión de plantas desaladoras por destilación oscila entre los 800 a 2,100 Dlls por metro cúbico de agua desalada (\$/m³), mientras que los costos de inversión de una planta desaladora por ósmosis inversa varía entre los 600 a 1,280 \$/m³, el costo de inversión de una desaladora de agua salobre es de unos

300 \$/m³ [Afgan et al, 1999, Valero et al, 2001, HOH, 2002]. Se estima para la región noroeste de México un costo de producción de agua desalada de en 0.74 USDlls/m³, 0.57 euros.

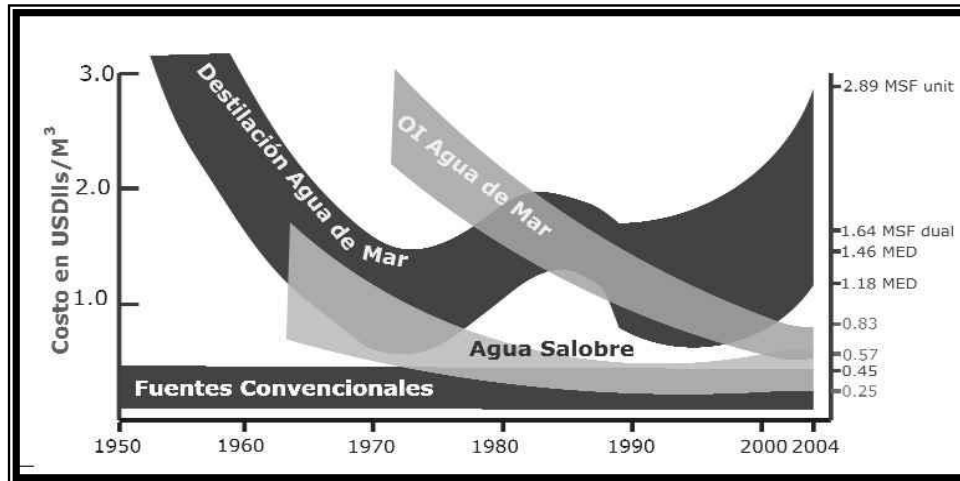


Figura 2. Comparativo de los costos históricos de la Desalación.

Consumo de Energía

El proceso de desalación demanda una importante cantidad de energía por ejemplo la energía que se requiere para desalar agua, por ósmosis inversa, en la actualidad está en el orden de los 2.4 a 5 kWh/m³. Sin embargo es necesario contrastar estos datos con el hecho de que el transporte de agua por el acueducto de Tijuana a Mexicali consume 4.2 kWh/m³ y que la elevación de agua de pozos a 400 metros consume 3.2 kWh/m³ nos indica que el transporte de agua y el bombeo de pozos profundos son procesos que consumen energía de manera intensiva y que además generan un deterioro progresivo de la calidad y cantidad de agua disponible.

En la región, se tiene una capacidad instalada de generación de 4,508 MW, 2652 en Baja California, 1555 en la porción de Sonora y 300.98 en Baja California Sur. Las principales plantas generadoras de energía se encuentran en la vecindad o conectadas a las zonas urbanas que contemplan o han

desarrollado proyectos para instalación de plantas desaladoras, estas ciudades son Guaymas y Puerto Peñasco en Sonora, Tijuana y Ensenada en Baja California, Los Cabos en Baja California Sur. Para estos proyectos la energía eléctrica no es una limitante para su instalación y operación. En estas localidades consideradas como polos de desarrollo la evolución económica y la presión social inciden sobre la disponibilidad de agua y energía, en el caso de la energía la demanda se satisface y se distribuye de manera más regular que el agua.

En la medida que la desalación sea capaz de aportar caudales seguros, de agua, en calidad y cantidad a precios competitivos con las fuentes actuales, en esa medida la desalación impulsará las actividades industriales y comerciales en la región. La industria consume solamente entre el 0.38% y el 1% del total del agua que se consume en la región, sin embargo a pesar de ser menor su consumo, la industria requiere de caudales seguros de agua en calidad y cantidad, principalmente la industria turística y de procesamiento de alimentos.

Los organismos operadores de la región le asignan el costo más alto al agua que se consume en la industria y comercio, por ejemplo en la zona de Guaymas-Empalme, Sonora, el costo del agua para industria es de 1.7 USDlls/m³, 1.3 euros y en Ensenada, Baja California es de 2.3 USDlls/m³, 1.76 euros. Por esta razón se observan en las principales zonas de atracción de turistas de la región (Cabo San Lucas en Baja California y Puerto Peñasco en Sonora) la instalación de plantas desaladoras

III. Descargas y Efectos de la Salmuera

La descarga de salmuera es la mayor fuente de impacto al medio ambiente, incluso más importante que la emisión indirecta de gases asociada al consumo de energía. La salmuera es una solución concentrada de agua de mar, donde el factor de concentración depende del rendimiento de la tecnología que se aplique (tabla 1), la salmuera también puede contener, en menor

concentración, soluciones de lavado, productos para reducir la corrosión y compuestos químicos que se emplean para el acondicionamiento del agua de mar y el agua potable producida.

En las plantas desaladoras por destilación tipo MSF la salmuera se descarga con temperaturas superiores a las del agua de mar entre 7 y 15 °C [Valero et al, 2001, UNEP, 2001]. Se ha publicado que la fauna marina no se ve afectada significativamente por la existencia de sistemas de descarga de salmuera gracias a su movilidad, incluso hay reportes de mayor captura de peces en áreas cercanas a las descargas de salmuera de plantas desaladoras por destilación, [Valero et al, 2001]. Sin embargo el impacto osmótico creado por la descarga de una salmuera concentrada puede afectar a las comunidades bentónicas [UNEP, 2001, Del Bebe et al, 1994], a este respecto se han publicado cambios en la composición de la macrofauna bentónica en la vecindad de una descarga de salmuera, (Argyrou, 1996).

Entre los diferentes tipos de obras y sistemas de descarga de salmuera, no existen datos que sean concluyentes respecto a cuál es el más eficiente y cuál es su efecto al medio ambiente marino. En cualquier caso, el diseño de una planta desaladora debe considerar la difusión eficiente de la salmuera para reducir el impacto osmótico al medio ambiente marino, [UNEP, 2001].

La mitigación del efecto de las descargas de salmuera demanda el desarrollo de modelos de predicción de distribución de la concentración de la salmuera en la zona de descarga y aplicar los métodos que de acuerdo a las características del proceso y de la zona costera generen una rápida dispersión de la salmuera, monitoreo de la calidad del agua del acuífero marino somero, del sustrato y de la columna de agua en la vecindad de la zona de descarga y en la zona de influencia predicha por los modelos.

A pesar, de que las regulaciones ambientales respecto de descargas al mar, de plantas desaladoras, indican la construcción de emisores submarinos, que se

extienden perpendiculares a la línea de costa la distancia necesaria para que se alcancen los 7 metros de profundidad (Ibrahim, 1998), este tipo de regulación que es útil para promover la dispersión de aguas residuales, de menor densidad que la del agua de mar, en el caso de las salmueras de mayor densidad este método no promueve su dispersión y puede impactar a las comunidades bentónicas vecinas a la zona de descarga.

La confirmación de impactos poco significativos hacia los ambientes costeros por la inyección de salmuera al acuífero somero vecino o por su descarga en emisores superficiales o marinos resultará de la definición de las zonas en las que se observe influencia potencial del efecto de la salmuera y del monitoreo de los datos. Basado en los modelos de dispersión, la salmuera debe exhibir un gradiente de dispersión desde la zona de descarga o punto de inyección hacia la zona costera. Se debe monitorear el gradiente de concentración por periodos de 30 días hasta cumplir un año y de ahí por periodos de 60 días hasta que exista la información suficiente que demuestre categóricamente la eficiencia el modelo de dispersión diseñado para cada caso. Tabla 2.

Especies Amenazadas

Los mamíferos marinos como Ballenas, Vaquita de Mar y las Tortugas marinas que aparecen en la legislación federal y estatales como especies “protegidas” no se encuentran en el hábitat de playa y zona de rompientes donde se puede dar la instalación de las descargas de plantas desaladoras, por esta razón el impacto de la descarga de salmuera se puede considerar “no significativo” a los recursos marinos.

Tabla 1.

Características de la descarga de salmuera según el proceso.

Efecto/Proceso	ÓSMOSIS INVERSA	DESTILACIÓN
Temperatura	Ambiente	7 a 15° C mayor a TA
Mezclado de Salmuera	No es Usual	Muy Usual con agua de enfriamiento de termoeléctrica
Factor de Concentración	De 1.43 a 2	≈1.18
Desinfectantes	Usual	Usual en mayor concentración
Productos de Corrosión (Metales)	Poco usual	Muy Usual
Detergentes y biocidas en periodos de mantenimiento y limpieza	Muy Usual	Poco Usual
Antiincrustantes que generan Eutroficación (derivados de fosfatos)	Usual	Muy Usual
Tipo de descarga	Superficial	Superficial (área de amortiguamiento y dilución)
	Submarina	
	Inyección	

Otras especies como algas marinas y crustáceos pueden sufrir su efecto, Argyrou (2000) y Falzon & Gingell (1990) publicaron la desaparición de mantos de algas en las inmediaciones de descargas de salmuera de plantas desaladoras. La construcción de las instalaciones pueden alterar los sitios de anidamiento de aves migratorias, según el caso, también la vegetación típica de las zonas de dunas y todas las especies que forman el hábitat de dunas; vegetales, reptiles incluso insectos.

La instalación de una planta desaladora debe considerar la evaluación del estado de la biota marina principalmente de la zona bentónica y durante la operación de la planta se deben de hacer muestreos mensualmente en los primeros 4 meses de operación y de ahí bimensualmente a lo largo de dos transectos. El transecto 1 se debe orientar perpendicularmente a la playa y partir desde el punto de descarga. El transecto 2 se debe trazar paralelo a la de costa con referencia a la línea de marea alta. Los puntos de muestreo de este transecto se deben de fijar a los 50, 100, 200 y 300 metros a ambos lados de la zona de descarga, en cada punto se debe evaluar el estado de la biota bentónica intermareal y evaluar su status, las muestras se deben de coleccionar durante las mareas que alcancen al menos un nivel de -15 cm durante el día, se deben tomar

en cada punto cuadrantes de 0.25m² a profundidades entre 25 y 30 cm. Se deben de considerar de manera especial aquellas especies que sirvan como indicadores del estado de la zona costera como el cangrejo *Emerita analoga* para las costas del océano pacifico. Cada muestra de sedimento se debe tamizar en un cedazo de 1,0 mm, [MCWD, 1999b].

Tabla 2.

Tecnología de descarga de salmuera, impacto ambiental y medidas de mitigación.

Tipo de Descarga	Impacto Ambiental	Medidas de Mitigación
Superficial	Contaminación visual, erosión, shock osmótico en las inmediaciones	Construcción de canales empedrados, asignación de zona de descarga y amortiguamiento
Inyección	Contaminación de acuífero costero por fugas en el pozo	Ubicar el pozo de inyección en contacto con el acuífero marino
Submarina	Shock osmótico a los organismos bentónicos, alteración del sustrato por el tendido y anclado de la tubería	Diseñar los difusores para que dispersen rápidamente la salmuera, tender las líneas donde no afecten comunidades bentónicas

IV. Disposición Sostenible del Agua de Rechazo del Proceso de Desalación en el Noroeste de México.

Después de más de 30 años de operación de plantas desaladoras en diferentes partes del mundo, hasta la fecha no se ha reportado ningún efecto nocivo significativo para el medio ambiente generado por una planta desaladora, sin embargo se debe de considerar que la mayoría de las plantas desaladoras de alta capacidad de producción, más de 20,000 m³/d, se han instalado en zonas donde la actividad económica, industrial y turística ha impactado y modificado el ecosistema previo a la instalación de la Planta Desaladora por lo que su impacto no implica mayor cambio, que el ya existente. Sin embargo, la zona costera del Noroeste de México se caracteriza por ser una zona muy rica en biodiversidad y productividad primaria, con zonas de reserva de la biosfera y ecosistemas en áreas naturales protegidas.

Es importante generar modelos tridimensionales para evaluar las capas de dispersión de la salmuera y considerar que estos flujos de salmuera tienen un gradiente de densidad superior al del agua del cuerpo del agua donde se descargan, estos caudales tienen una boyancia negativa y por lo mismo tienden a hundirse hasta el fondo. Por lo mismo se genera una interacción con el fondo marino como una capa estratificada que puede reducir la difusión de oxígeno y crea en los sedimentos condiciones de hipoxia. En el alto golfo de California algunas zonas experimentan episodios de hipoxia de manera natural debido a que una alta incidencia solar y baja intensidad del viento provocan alta evaporación incrementan la salinidad y la densidad del agua de mar, la cual tiende a migrar al fondo y formar zonas estratificadas [López M & García 2003], en estas zona la presencia de una descarga de salmuera puede exacerbar esta condición. Si la descarga se hace mediante emisores submarinos, además de evitar los ecosistemas algales bentónicos se debe de promover una mayor mezcla de la salmuera mediante difusores elevados, figura 3.

La evaluación de las propiedades de difusión del medio, como los perfiles de temperatura y salinidad, corrientes, coeficientes de dispersión y de autodepuración, biocenosis y contaminación, batimetrías, geofísica, geotecnia, clima marítimo y dinámica litoral deben de conjugarse con el diseño de difusores para que el área de extensión de las zonas de concentraciones de salmuera mayores a la DL_{50} sea la mínima posible y su interacción con comunidades marinas del ecosistema del litoral y zona marítimo terrestre del Pacífico de Baja California y Golfo de California en Baja California y Sonora, debe ser nula.

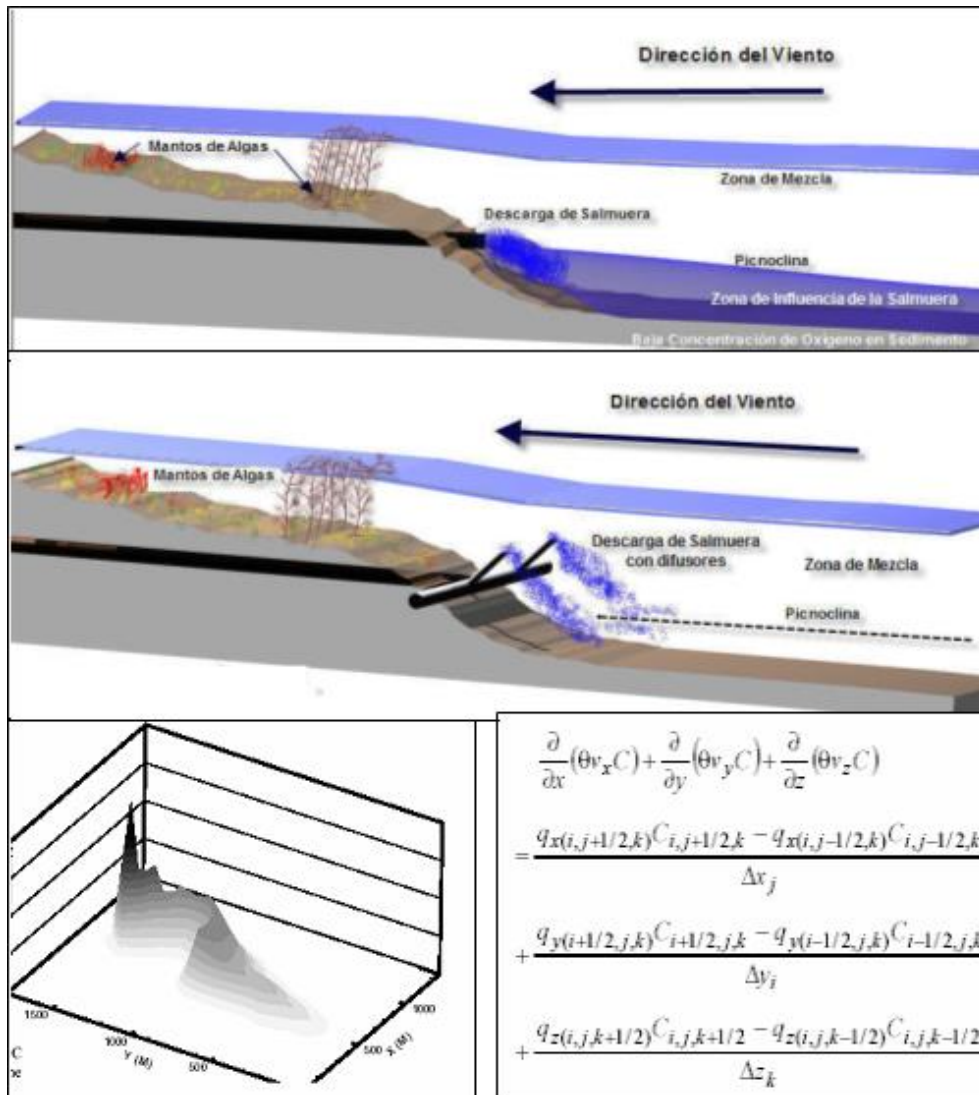


Figura 3.- Modelos de dispersión y zonas de influencia de Salmuera

Por lo tanto es recomendable dispersar la salmuera en emisores submarinos tendidos, mar adentro, en el lecho submarino hasta que se alcancen más de 8 m de profundidad para evitar las zonas con mantos de algas, en Baja California en las costas del océano pacífico existen mantos de la macroalga parda *Macrocystis pyrifera* que forma bosques de algas que forman un importante ecosistema y es un recurso de importancia económica, estas algas crecen a profundidades de 5 a 10 m y su longitud promedio es de unos 15m, especial consideración se deberá de tener en caso de proyectar una planta desaladora en el pacífico de Baja California especialmente en zonas donde existan mantos de *Macrocystis* y *Pelagoficus* sp. En la costa del Golfo de California, especial

atención merecen los ecosistemas formados por mantos de algas rojas *Eucheuma uncinatum* y de *Gracilaria lemaneiformis*.

Acorde a la legislación es muy importante considerar que en la zona de playa, sea de arenas, materiales sueltos o gravas, deberá presentarse especial atención a las variaciones estacionales del perfil de playa, así como al perfil de erosión que puede resultar de temporales y tormentas previsibles, de manera que la estructura del emisor o emisores no sea afectado por estas variaciones con una probabilidad admisible.

Esta estabilidad mecánica y estructural de la obra debe ser acorde a las fuerzas del mar a las que se va a exponer. Se debe asegurar la estabilidad química de los materiales empleados en la obra de manera que resistan la capacidad corrosiva del agua de mar y de la salmuera que conducen. El sistema de impulsión debe procurar el menor consumo de energía y aprovechar en lo posible el vertido por gravedad. No obstante, en todos los casos deberá garantizarse la adecuación del caudal del emisor a las diferentes condiciones de funcionamiento, tales como caudal afluente, nivel del mar y pérdidas de carga. Por lo que de ser necesario se debe de instalar una estación de bombeo en la cabecera del emisor. La descarga de salmuera mediante inyección en pozos y o mediante percolación en pozas es viable incluso recomendable en casos donde los caudales y las condiciones geohidrológicas del acuífero marino somero lo permiten debido a un adecuado tamaño de poro y capacidad de dispersión [MCWD 1992]. Esta forma de dispersión permite la difusión gradual de la salmuera dentro del acuífero marino y va reduciendo su salinidad conforme avanza hacia la playa de tal forma que cuando esta salmuera alcanza la zona de rompientes la salinidad es menor a la concentración tóxica o de 40,000 ppm que es la DL_{50} para la zona de las costa del pacífico de Baja California.

Los bioensayos de toxicidad en gametos de erizo morado y erizo blanco *Strongylocentrotus purpuratus* y *Lytechinus anamesus*, realizados en el laboratorio de la Facultad de Ciencias Marinas (Correa Díaz, 2005) en Ensenada, Baja California, como se expresó anteriormente indican que la concentración de salmuera que genera la dosis letal media, DL_{50} , es de uno 39,980 ppm que corresponde a una salinidad 1.19 veces superior a la normal. La prueba de fertilización del erizo marino es un bioensayo común en el monitoreo ambiental, y de esta forma se busca la regulación de afluencias industriales y sedimentarias. Las agencias de Protección del Ambiente de los Estados Unidos de América, USA-EPA. y Canadienses evalúan las situaciones utilizando gametos de erizos y galletas de mar bajo distintas condiciones de salinidad. La prueba de citotóxicidad y antimitosicidad en huevos fertilizados de erizo ha sido utilizada ampliamente por biólogos y bioquímicos debido a la simplicidad y tamaño de las células, características que permiten visualizar resultados con relativa facilidad en estudios sencillos de división celular hasta en aquellos que incluyen un fuerte componente molecular. Una vez fertilizados los huevos, los embriones sufren divisiones sincrónicas en los primeros clivajes, permiten obtener un alto grado de uniformidad célula a célula cuando se investigan procesos tales como la mitosis, el clivaje o los eventos bioquímicos que ocurren durante la replicación celular. Es también útil para el estudio de la acción de drogas, ya que el embrión se expone a la droga durante los mismos estados del ciclo celular, se logra de esta forma, un alto grado de reproducibilidad así como de uniformidad en estudios farmacológicos [O'Brien *et al.*, 1989]. La calidad del agua de alimentación debe ser tal que la concentración de metales pesados sea nula o muy baja respecto a los límites máximos tolerables, la razón es que al pasar por un sistema de desalación por ósmosis inversa su concentración, en la descarga de salmuera, se va a incrementar al doble y se deben de evitar niveles de concentración, de acuerdo a la tabla 3.

Tabla 3. Límites de Toxicidad en Aguas de la Costa de California (USA)

Constituyente	Concentración Natural (mg l ⁻¹)	Límite Máximo (mg l ⁻¹)	Toxicidad Crónica (mg l ⁻¹)	Concentración en salmuera (mg l ⁻¹)
Arsénico	3.0000	8.00	19.0	5.970
Cadmio	0.0000	1.00	8.0	0.000
Cromo	0.0000	2.00	18.0	0.000
Cobre	2.0000	3.00	5.0	3.990
Plomo	0.0000	2.00	22.0	0.000
Mercurio	0.0005	0.04	0.4	0.001
Níquel	0.0000	5.00	48.0	0.000
Plata	0.1600	0.70	3.0	0.370
Zinc	8.0000	20.00	51.0	0.000
OD	7.0-9.0	6.30	-	7.0-9.0
pH	8.2	8.00	-	7.0 ^b

^a Promedio en seis meses.

^b Antes del tratamiento.

V. Referencias

Afgan, N. H., Darwish, M., & Carvalho, M. G. (1999). *Sustainability Assessment of Desalination Plants for Water Production*. Desalination 124, pp. 19-32.

Argyrou, M. (2000). *Impact of Desalination Plant on Marine Macrobenthos in the Coastal Water of Dehkelia Bay, Cyprus*. Internal Report.

California Coastal Commission. CCC. (2004). [en línea] *Seawater Desalination and the California Coastal Act*. 2004. CCC. California USA. Consultado el 23 de mayo del 2004. Disponible en World Wide Web en: <http://www.coastal.ca.gov/energy/14a-3-2004-desalination.pdf>

CNA. (2003). *Consumo de agua en las principales localidades del Noroeste de México*. Gobierno de México.

Correa, D. F. (2005). [en línea] *Apuntes y resultados de análisis del Laboratorio de Bioensayos de la Facultad de Ciencias Marinas*. Disponible en World Wide Web

Del Bebe, J.V., Gerhard, J., & Largier, J. (1994). *Ocean Brine Disposal*. Desalination. Vol. 97, pp. 365-372 .

- HOH. (2002). [en línea] *Economic and Technical Information Desalination*. Model SeaRO-84ERS 1000 m³/day. Consultado el 13 de abril del 2004. Disponible en World Wide Web en: <http://www.hohusa.net/>
- Ibrahim-Perera, J.C. (1998). *Desalación de Agua de Mar*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Gran Canaraia. ISBN 84-380-0156-4
- Inima-OHL. (2004). *OHL se adjudica la construcción y gestión de una desaladora en México por 15 millones* [citado el 7 de enero del 2004]. Disponible en World Wide Web en: <http://www.finanzas.com/id.6429200/noticias/noticia.htm>
- López, M., & García, J. (2003). Moored observations in the northern Gulf of California: A strong bottom current. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 108, NO. C2, 3048,*
- Margara, Y., & Iso, S., Healt. (2006). [en línea] *Safety and Environmental Considerations, in Membrane Processes, de Encyclopedia of Desalination and Water Resources*, Eolss Publishers, Oxford, UK. Disponible en World Wide Web en: www.desware.net
- Marina Coast Water Distric, MCWD. (1999). *Environmental Impact Study*. Marina, California USA.
- Marina Coast Water District. (1999). *Desalination Plant-Intake Well. General Mineral, general Physical, inorganic chemicals*. Marina California USA.
- Marina Country Water District. (1992). *Desalination Feasibility Study*. Marina California USA.
- O'Brien, E.T., Asai, D.J., Jacobs, R.S., & Wilson, L. (1989). *Selective inhibition of cytokinesis in sea urchin embryos by low concentrations of stypoldione, a marine natural product that reacts with sulfhydryl groups*. *Molecular Pharmacol.* 35:635-642.
- OOMSAPASLC. (2003). [en línea] *Municipio de los Cabos, Baja California Sur, México*. Consultado el 13 de agosto del 2003. Disponible en World Wide Web en: www.loscabos.gob.mx
- Shaw, W. N., & Hassler, T. J. (1989). *Species profiles: life histories and environmental requirements of coastal fishes and invertebrates (Pacific Southwest)*. Pismo clam. United States, Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Biological Report 82(11.95): 12 pp.

United Nations Environment Programme. UNEP. (2001). *Seawater Desalination in Mediterranean Countries: Assessment of Environmental Impacts and Proposed Guidelines for the Management of Brine*. Venice, Italy, 28-31

Valero, A., Uche, J., & Serra, L. (2001). *La Desalación como Alternativa al PHN*, Presidencia del Gobierno de Aragón. España.

Water Desalination Report. (1970). Vol. VI, No. 11. March 12.

Water Desalination Report. (2001). Vol. 37, No. 47. November 29.

Zúñiga, J. C. (2001). *Aprueban el agua desalada en \$8.22, Sólo falta que el Congreso local otorgue el aval para un crédito de \$250 millones para firmar contrato con FENOSA*. 7 de abril del 2001. Periódico el Imparcial de Sonora, Sonora, México.

CAPÍTULO 4.

LOCALIZACIÓN DE OBRA DE TOMA DE AGUA DE MAR, PARA INSTALACIÓN DE UNA DESALADORA EN GUAYMAS, SONORA.

Germán Eduardo Dévora Isiordia, Rodrigo González Enríquez, Juan M. Milian

¹ german.devora@itson.edu.mx, rodrigo.gonzalez@itson.edu.mx

Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de
Sonora, Cd Obregón-Sonora, México. Tel: +52 -410 90 00 Ext. 1716

² juan.milian@radiall.com

Estudiante de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales, Instituto Tecnológico de
Sonora, Cd Obregón-Sonora, México.

SUMARIO: I. *Introducción*, II. *Materiales y Métodos*, III. *Resultados y su Discusión*,
IV. *Conclusiones*, V. *Referencias*

Resumen

Para satisfacer las demandas de la creciente población del estado de Sonora como en el caso de Guaymas, San Carlos y Empalme, se tiene una explotación constante del acueducto Yaqui-Guaymas, sin embargo, ni con la actual importación de agua desde otras cuencas en la región noroeste de México se ha podido resolver el problema de satisfacer sus demandas actuales ni garantizar su desarrollo a mediano plazo. Por lo tanto, se planteó el objetivo de localizar sitios potenciales para suministrar a plantas desaladoras, para enfrentar la escasez de agua en la zona de Guaymas, Sonora. Para esto se visitaron tres empresas Propeguay, Delfinario y Selecta de Guaymas. Se les proyectó la demanda de agua en un horizonte de quince años. Posteriormente se colectaron muestras de agua de mar directa y en pozos playeros. Se les midió microbiológicos, fisicoquímicos y metales. El análisis de calidad del agua en estos tres sitios indicó que los niveles más bajos en Sodio (8,970 mg/L), Cloruros (17,868.3 mg/L), Potasio (179.9 mg/L), Sulfatos (2,263.4 mg/L), Coliformes totales (0 NMP), están en la zona del Delfinario además de la más baja concentración de carga orgánica y de metales, por lo que se considera que es la zona más apta para localizar la obra de toma de agua de mar, para instalación de una planta desaladora.

Palabras claves: *Desalinización, Ósmosis Inversa, Obra de toma*

I. Introducción

A nivel mundial el crecimiento poblacional y económico demanda cada día una mayor cantidad de agua para todos los sectores (Teruyuki, 2003), además existen problemas técnicos y económicos para incrementar la disponibilidad de agua, a los que se añaden problemas sociales por la resistencia a la aceptación de agua proveniente de una fuente no convencional (Medina, 2005). En México se enfrentan severos problemas de abasto de agua ante la creciente demanda de la población por contar con el vital líquido, dos terceras partes del país son zonas áridas o semiáridas, en ellas se concentra el 77 por ciento de la población, se genera el 84 por ciento de la actividad económica, y se registra únicamente el 28 por ciento de escurrimiento del agua (Fuentes, 2005). Aunado a lo anterior, la baja eficiencia con la que se usa el agua, acentúa las carencias en diversas zonas del país.

En cuanto al agua subterránea, la sobreexplotación ha generado intrusión salina y a nivel nacional se presenta en 17 acuíferos costeros en los Estados de Baja California Sur, Baja California, Sonora, Veracruz y Colima, afectando primordialmente a los siguientes acuíferos: La Paz y el valle de Santo Domingo en Baja California Sur; San Quintín, en Baja California; y Guaymas y Costa de Hermosillo, en Sonora, esto obligó a buscar otras fuentes de abastecimiento de agua dulce más alejadas, considerándose la necesidad de construir acueductos para importar aguas de otras cuencas (ICGSA, 2007).

Bajo este contexto, y el agravamiento de escasez del recurso hídrico hace prever que estas actividades de desalinización experimentarán un desarrollo notable en el futuro y la desalación se ve como una esperanza para una vida mejor, pues su desarrollo depende de la disponibilidad de agua (Sorg, 1978 y Sporn, 1996) y la tecnología de desalación para aguas salobres o de mar ha progresado en los últimos 5 a 10 años hasta niveles de eficiencia y costos que permiten su utilización en sectores que hace poco tiempo eran inimaginables (Powell, 1986 y Pankratz, 2007), sin embargo para enfrentar esta situación, se

requiere considerar el valor esencial que tiene el agua como elemento estratégico para atender las necesidades sociales básicas de la población e impulsar el desarrollo económico de las actividades económicas del país (Valencia, 2000), para así lograr el manejo integrado y sustentable del agua en cuencas y acuíferos, considerando entre otras estrategias, la de orientar la demanda de agua de acuerdo a la disponibilidad en cuencas y acuíferos y la de dar prioridad a las acciones que propician la reducción de la demanda, esto permitirá cuantificar técnica y económicamente las metodologías desarrolladas y validadas, para seleccionar, con base en sus ventajas y desventajas, las tecnologías que conviene adquirir y las condiciones de financiamiento para su implantación en México, en el corto, mediano y largo plazo (Torrent, 1998).

Por otra parte para satisfacer las demandas de la población de los municipios de Guaymas, San Carlos y Empalme, existe una explotación constante del acueducto Yaqui-Guaymas del orden de 550 LPS, equivalentes 17'344,800 m³/año (CONAGUA, 2006), sin embargo, ni con la actual importación de agua desde otras cuencas en la región noroeste de México se ha podido resolver el problema de satisfacer sus demandas actuales y mucho menos garantizar las futuras (González, 2006). Por lo que el objetivo del presente trabajo fue el de determinar la localización de fuentes de abastecimiento de agua de mar tanto de pozo como de mar abierto, mediante análisis de calidad del agua y evaluación técnica, que permita la instalación de una planta desaladora en el Noroeste de Sonora.

II. Materiales y Métodos

El área de estudio corresponde a la zona Noroeste de México, en la zona del municipio y puerto de Guaymas, Sonora. Para cumplir el objetivo de este estudio, se desarrolló la siguiente metodología.

Se evaluaron las perspectivas y requerimientos de desalación del agua en México para enfrentar problemas de escasez de agua en zonas áridas y semiáridas del país, donde se realizó un inventario de poblaciones costeras de zonas áridas y semiáridas con problemas de disponibilidad de agua.

Se visitaron empresas de la población seleccionada y se proyectó su crecimiento ante los esquemas actuales de desarrollo económico de cada industria y se correlacionará el consumo de agua a futuro, para predecir su demanda en un horizonte de proyección a 10 años. Se evaluaron las tecnologías disponibles y en desarrollo que pueden ser económicamente más accesibles a la situación del país y de la región en estudio.

Se realizó una comparación técnica y económica, entre estas tecnologías, tomando como base la tecnología más utilizada actualmente, que es Ósmosis Inversa, para ello se utilizó el inventario mundial de plantas desaladoras reportadas en los últimos cinco años por la asociación internacional de desalación (IDA), que incluyó los sitios de ubicación y la inversión realizada.

Los procesos a incluir son, Electrodiálisis Reversible, Ósmosis Inversa, Evaporación Súbita y Compresión de Vapor, esto permitió comparar la operación técnica y económica de osmosis inversa con respecto a los otros procesos, así como su potencial implementación en México.

Para la recolección de muestras se elaboró un programa de muestreo y se colectaron según el manual de campo para el muestreo de la calidad del agua. Las muestras a coleccionar fueron de empresas que cuentan pozos playeros y tomas de agua de mar directa. Una vez tomadas las muestras, se enviaron a laboratorio certificado donde se utilizaron métodos analíticos estandarizados de APHA (1989) y se analizaron aniones, cationes mayores, metales, y bacteriológicos.

Instalar una planta desaladora móvil en el sitio idóneo y determinar la factibilidad técnica del proceso, además de la evaluación para encontrar la sustentabilidad económica y financiera. Esto se realizará en base a la demanda

actual y potencial demanda de agua potable, considerando las tendencias del crecimiento esperado de la población o empresa, ante los esquemas actuales de desarrollo económico de la región.

Desarrollo de las especificaciones que deben cumplir las plantas desaladoras de aguas marinas y salobres para no afectar a cuerpos receptores con descargas y residuos del proceso, así como para cumplir con la calidad demandada por los usuarios, dando prioridad a tecnologías que no requieren compuestos químicos para su operación y lavado y que además utilicen energía no contaminante o energías alternas. Para desarrollar las especificaciones que determinarán la mejor alternativa, se considerarán 5 factores: a) la capacidad sustentable de aporte de las fuentes de agua a desalinizar, b) la eficacia operativa de las técnicas de desalinización, c) el manejo ambiental de los desechos de las plantas desaladoras, d) los costos de inversión y operación, y e) la aceptación social de las plantas. La capacidad de las fuentes de abastecimiento se definirá por el aporte sustentable de aguas salobres de los acuíferos costeros y de las aguas marinas de las zonas litorales, según sea el caso.

Para lograr la desmineralización de las fuentes de abastecimiento de agua, se habilitará una planta piloto móvil que permitirá la desalación usando aguas con diferente concentración marina. La planta contará con filtros multimedia, filtros de carbón activado, tanques de suavización, sistema de desinfección pudiendo tener generadores de ozono, clorinadores o lámparas de luz ultravioleta, bombas dosificadoras de reactivos químicos y anticrustantes para mantener eficientemente el proceso de desalación.

El diseño experimental consistirá en determinar la eficiencia de la desalinización del agua, variando la concentración salina del agua desde >1,000 hasta <35,000 mg/L de sólidos totales disueltos (SDT)

Se elaborará un plan de manejo para los desechos de las plantas desaladoras, y se determinará la capacidad potencial que presentan los cuerpos

receptores para amortiguar las descargas de las salmueras, mediante bioensayos toxicológicos con especies de interés comercial y ecológico, esto permitirá que no se rebase el volumen de salmuera susceptible que genere un daño ambiental o económico.

Se elaborará un plan de vigilancia y monitoreo, que verifique el grado de cumplimiento de la operación del proceso, además que para garantizar la eficiencia de la planta instalada se medirá periódicamente: a) la eficiencia de remoción de los elementos de interés a eliminar del agua incluidos en el análisis de los parámetros de calidad que marca la NOM-127-SSA1-1994 y su enmienda realizada en el 2000, correspondiente para el agua de consumo humano. Además se medirá la concentración de contaminantes en la descarga de desechos de salmuera para asegurar el cumplimiento de esta NOM y otras normas ecológicas como la de descarga de desechos a cuerpos de agua nacionales. Con los resultados del plan de monitoreo, se evaluará el grado de cumplimiento de la empresa y se establecerán las acciones preventivas y correctivas para resolver los problemas de afectación donde correspondan.

III. Resultados y su Discusión

El área de estudio es la zona Noroeste de México, en el municipio y puerto de Guaymas, Sonora, con latitud 27.913961° y longitud -110.902075° (Figura 1).

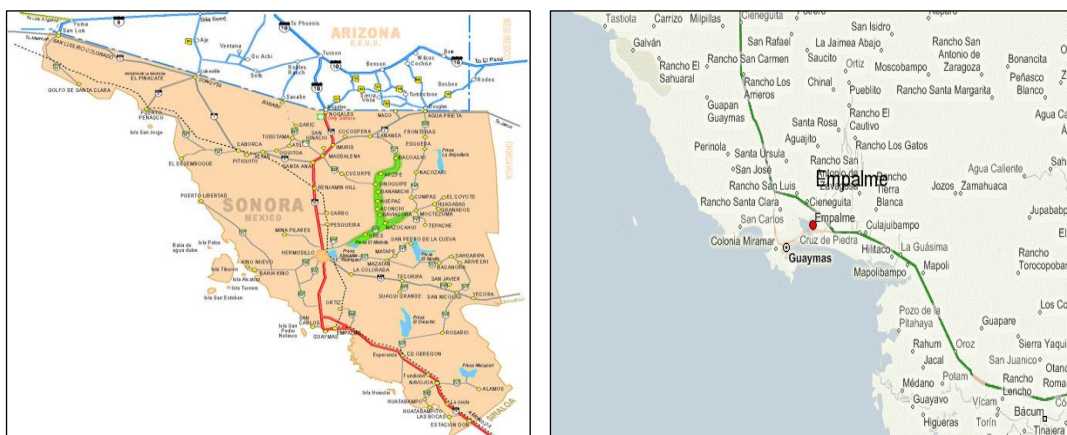


Figura 1. Zona de estudio en los municipios de Guaymas y Empalme; Sonora.

Desarrollo de las tecnologías de desalación en México

La tabla 1 indica lugar, capacidad de producción, tecnología y fabricante, proveedor de tecnología que instalará plantas desalinizadoras en los diferentes estados de México para los años 2008 y 2009.

Tabla 1.
Plantas desaladoras por instalarse en México.

Lugar	Producción m ³ /d	Tecnología	Calidad del agua	Empresa
Cancún, Quintana Roo	1,000	Ósmosis Inversa	Agua de mar	Degrémont
Cancún, Quintana Roo	1,000	Ósmosis Inversa	Agua de mar	Degrémont
Cancún, Quintana Roo	568	Ósmosis Inversa	Agua de mar	STS de México
Cancún, Quintana Roo	500	Ósmosis Inversa	Agua de mar	STS de México
Cancún, Quintana Roo	550	Ósmosis Inversa	Agua de mar	STS de México
Catalonia Hotel , Quintana Roo	500	Ósmosis Inversa	Agua de mar	STS de México
Chileno Bay, BCS	4,000	Ósmosis Inversa	Agua de mar	Bekox/VWS Ibérica
Gran Gala Hotel, Quintana Roo	1,134	Ósmosis Inversa	Agua Salobre	STS de México
Ixtapa, Guerrero	327	Ósmosis Inversa	Agua de mar	GE Osmonics
La Paz, BCS	120	Destilación Múltiple Efecto	Agua de mar	IDE
Pto. Peñasco, Sonora	870	Ósmosis Inversa	Agua de mar	STS de México
Mazatlán, Sinaloa	768	Destilación Múltiple Efecto	Agua de mar	IDE
México	1,636	Ósmosis Inversa	Agua Salobre	GE Water
México	1,636	Ósmosis Inversa	Agua Salobre	GE Water
México	1,636	Ósmosis Inversa	Agua Salobre	GE Water
México	1,636	Ósmosis Inversa	Agua Salobre	GE Water
México	1,364	Ósmosis Inversa	Agua Salobre	GE Water
México	1,091	Ósmosis Inversa	Agua Salobre	GE Water
México	1,091	Ósmosis Inversa	Agua de mar	GE Water
Los Cabos, BCS	230	Ósmosis Inversa	Agua de mar	VWS México
Los Cabos, BCS	460	Ósmosis Inversa	Agua de mar	VWS México
Puerto Vallarta, Jalisco	1,635	Ósmosis Inversa	Agua de mar	GE Osmonics
Pto. Peñasco, Sonora	401	Ósmosis Inversa	Agua de mar	STS de México
Riviera Maya, Quintana Roo	150	Ósmosis Inversa	Agua Salobre	STS de México
Riviera Maya, Quintana Roo	273	Ósmosis Inversa	Agua Salobre	STS de México
Tuxpan, Veracruz	280	Ósmosis Inversa	Agua de mar	Mitsubishi
Puerto Vallarta, Jalisco	500	Ósmosis Inversa	Agua de mar	STS de México

Fuente: IDA Yearbook 2007-2008.

Es evidente que la tecnología en materia de desalación sigue apuntalando en el sector turismo y los estados de Quintana Roo y Baja California Sur son los más desarrollados en este aspecto. Sin embargo el estado

de Sonora, se vislumbra como potencial desarrollador de tecnología de desalación en los próximos años.

Comparación de Tecnologías a Nivel Mundial

Por otra parte, se muestran cuadros comparativos para visualizar el costo de producción por metro cúbico de agua desalada, así como la inversión inicial de la planta desaladora. La tabla 2 muestra también el tipo de contrato con que se realizó la operación de compra, se enlista además en la tabla la capacidad de producción, eficiencia del proceso, el grado de remoción del agua producto respecto a la concentración del agua de alimentación. Las instalaciones más recurrentes son para la tecnología de Ósmosis Inversa para agua de mar. Variando la capacidad de producción entre 10,000 m³/d y 295,252 m³/d. Además la inversión está entre 13.5 y 480 millones USD.

Tabla 2.

Costos de inversión, operación y tipo de contrato por tecnología.

Lugar	Tecnología	Contrato	Inversión	Capacidad
			Millones USD	producción (m ³ /d)
Nassau, Bahamas	Ósmosis Inversa ^a	BOT	29.5	27,252
Dhekelia, Chipre	Ósmosis Inversa ^a	BOT	41.0	40,000
El paso, USA	Ósmosis Inversa ^b	BOT	87.0	104,000
Larnaca, Chipre	Ósmosis Inversa ^a	BOT	75.0	54,000
California, USA	Ósmosis inversa ^a y Microfiltración	NP	480.0	295,255
Perth, Australia	Ósmosis Inversa ^a	DBO	347.0	143,700
Sereya, Singapur	Ósmosis Inversa ^a	DBO	13.5	10,000
Florida, USA	Ósmosis Inversa ^a	BOT	158.0	108,820
Wadi Main Jordania	Ósmosis Inversa ^b	DBO	125.0	128,767

Nomenclatura: agua de mar – ^a, agua salobre – ^b, BOT: Build, Operate and Transfer
DBO: Diseño-Operación-Construcción, NP: No publicado.

La tabla 3 muestra una comparación de costos de producción, grado de remoción tanto del agua de alimentación como del agua producto, porcentaje de permeado y el consumo energético por metro cúbico de agua producida para

diferentes países del Mundo. Mostrando un promedio de eficiencia del 45% para agua de mar y 87% para agua salobre. Mientras que el costo de producción varia de 0.41 USD/m³ hasta 1.32 USD/m³ (IDA, 2007).

Tabla 3.

Costo de producción, y grado de remoción por tecnología.

Lugar	Costo de producción (USD/m ³)	Permeado (%)	SDT alimentación (mg/L)	SDT producto (mg/L)	Consumo (kWh/m ³)
Nassau, Bahamas	1.32	42.5	37,500	< 450	0.72
Dhekelia, Chipre	1.19	50.0	40,570	< 500	5.30
El Paso, USA	0.41	80.0	2,550	< 500	NP
Larnaca, Chipre	0.76	50.0	40,300	< 500	4.52
California, USA	NP	90.0	1,000	30	NP
Perth, Australia	1.20	42.6	36,500	30	4.00
Seraya, Singapur	NP	42.0	38,000	NP	NP
Florida, USA	0.84	41.8	32,000	<500	2.96
Wadi Ma'in, Jordania	NP	90.0	2,000	250	NP

Fuente: IDA Yearbook 2007-2008, NP= No publicado

Por otra parte el consumo energético varia de 0.72 kWh/m³ hasta 5.30 kWh/m³. Tanto el costo de producción como el consumo energético tienen ese rango de variación debido a la calidad del agua de alimentación al proceso de desalación, ya que en algunos corresponde a agua de mar y otras a agua salobre (IDA, 2007)

Proyección de Crecimiento y Demanda de Agua en Sonora

La tabla 4 muestra la demanda que tienen las principales ciudades del Estado de Sonora con problemas de abastecimiento, según las tendencias del crecimiento poblacional, ante los esquemas actuales de desarrollo económico de la región.

Tabla 4.

Principales ciudades con problemas de agua y su proyección de demanda al año 2030.

Ciudad	No. de habitantes				Proyección al 2030	
	1980	1990	2000	2005	Habitantes	m ³ /año
Hermosillo	340,779	448,966	629,882	691,164	955,129	87'155,521
Guaymas	97,962	129,092	133,895	139,588	156,802	14'308,183
Empalme	41,063	46,017	51,494	55,080	68,108	6'214,855
Puerto Peñasco	26,755	26,625	37,416	33,730	61,413	5'603,936
Huatabampo	60,399	70,027	78,517	80,924	95,601	8'723,591
Sumatoria	568,938	722,717	933,204	1,002,491	1,337,053	122,006,087

Fuente: INEGI, 1980, 1990, 2000 y 2005.

La ciudad de Hermosillo presenta una demanda de 87,155,521.0 m³/año al 2030, mientras que para Guaymas se observa una demanda de 14,308,183 m³/año. Sin embargo Guaymas se presenta como un puerto y centro turístico del estado, que tiene grandes desarrollos, entre ellos de materia de agua, siendo la desalación parte fundamental para el desarrollo de esta región.

Proyección de Demanda en Sitios Muestreados

Las empresas visitadas de la población seleccionada en Guaymas, Sonora fueron tres, figurando dos empresas del sector de procesamiento de pescados y mariscos, además de una empresa del sector de servicios y de atención a niños con habilidades diferentes (Delfinario, San Carlos, Sonora). Figura 2.



Figura 2. Localización de empresas en color amarillo en el municipio de Guaymas, Sonora.

La proyección de crecimiento en la demanda de agua, en las industrias antes mencionadas al año 2015 en un horizonte a 10 años se muestra en la tabla 5.

Tabla 5.

Consumo de empresas de servicios e industrial y su proyección al año 2015.

Empresa	Sector	Toma de alimentación	Consumo actual 2009 en m ³ /año	Demanda año 2015 en m ³ /año
Delfinario	Servicios	Pozo playero	19,200	28,800
Selecta	Industrial	Toma abierta	15,550	21,770
Propeguay	Industrial	Pozo playero	36,500	54,750

Muestreo de Calidad de Agua en Sitios Seleccionados

Según el programa de muestreo, recolección (AWWRC, 1995) y análisis (APHA-AWWA-WPCF, 1992), la calidad del agua tanto fisicoquímica, bacteriológica y metales (AWWA, 1998) presentes en pozos playeros y/o tomas de agua de mar directa, muestran los siguientes resultados.

Los resultados respecto al análisis de metales pesados se indican en la tabla 6.

Basándose en la NOM-0127-SSA1-1994(2000), todos los sitios muestreados están dentro de los límites permisibles para consumo humano, lo que evidencia que la localización de la obra de toma puede ser satisfactoria en cualquiera de los sitios, pero Propeguay muestra una concentración de Hierro de 1.151 mg/l, superior al límite permisible de 0.3 mg/l marcado por la NOM-0127-SSA1-1994(2000), sin embargo se debe reforzar la decisión con análisis bacteriológicos y fisicoquímicos.

Tabla 6.

Metales pesados del agua en empresas del municipio de Guaymas, Sonora.

Muestra	mg/L						µg/L		
	Zn	Cu	Fe	Mn	Ni	Cd	Pb	As	Hg
Selecta	0.002	0.023	0.167	0.003	<0.01	<0.002	<0.01	<0.20	<0.20
Delfinario	0.120	0.025	0.306	0.011	0.046	<0.002	<0.01	<0.20	<0.20
Propeguay	0.024	<0.003	1.151	0.403	<0.01	<0.002	<0.01	<0.20	<0.20

Los resultados del análisis bacteriológico se muestran en la tabla 7. El contenido de organismos resultante del examen de una muestra simple de agua, indica que para Propeguay y Selecta de Guaymas, existe una presencia de Coliformes totales y fecales en 400 NMP/100 mL, lo cual rectifica la presencia de carga orgánica excesiva en la zona donde se encuentran estas industrias como se muestra en la figura 1. Por otro lado, Delfinario de Guaymas, se encuentra en una zona a mar abierto, lo que permite un constante oleaje y evita el estancamiento de materia orgánica, además que esta zona no se caracteriza por ser industrial a diferencia de Selecta de Guaymas y Propeguay, que están ubicadas en un parque industrial marino, donde hay evidencia de problemas de contaminación muy severos.

Tabla 7.

Calidad bacteriológica del agua en Guaymas, Sonora.

Muestra	Coliformes totales	Coliformes fecales
	NMP/100 mL	NMP/100 mL
Propeguay	400.0	400.0
Delfinario	0.0	0.0
Selecta	400.0	400.0

Los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico se presentan en la tabla 8. Delfinario presenta la menor cantidad de Cloruros en el agua de mar, con 17,868.3 mg/L, mientras que la mayor cantidad se presenta en Selecta de Guaymas, con 19,853.7 mg/L. En cuanto a la concentración de Sodio, se encontró que el sitio con mayor salinidad es en Selecta de Guaymas con 11,500 mg/L, mientras que la menor concentración se encuentra nuevamente en el Delfinario, con 8,970 mg/L.

Tabla 8. Calidad fisicoquímica del agua en empresas del municipio de Guaymas.

Muestra	mg/L							
	Calcio	Magnesio	Sodio	Potasio	Carbonatos	Bicarbonatos	Cloruros	Sulfatos
Selecta	400.0	1,304.0	11,500.0	391.0	0.0	163.3	19,853.7	2,712.3
Delfinario	1,240.0	1,448.0	8,970.0	179.9	0.0	178.9	17,868.3	2,263.4
Propeguay	412.0	1,186.5	11,270.0	430.1	0.0	158.6	19,655.1	2,630.3

Debido a los bajos niveles de sodio, cloruros, potasio, sulfatos presentes en la zona del Delfinario y considerando que la eficiencia de remoción de sales en el proceso de desalación es directamente proporcional a la cantidad de sales presentes en la toma de alimentación, además de la baja concentración de carga orgánica y de metales, se considera que es la zona más apta para localizar la obra de toma de agua de mar.

Determinación de la factibilidad de la técnica del proceso de desalación. Se adaptó una planta desaladora por Osmosis Inversa en el CET-910 para su análisis y adaptación en el sitio de muestra seleccionado. Durante el estudio de

factibilidad se realizaron simulaciones para determinar si el proceso es adecuado para el sitio seleccionado, además de realizar pruebas comparativas con normas aplicables al proceso como es la NOM-127-SSA1-1994(2000) ver Figura 3.



Figura 3. Planta piloto de Osmosis Inversa.

La planta desaladora por Osmosis Inversa ubicada en el CET-910 cuenta con una capacidad de producción de 150 m³/d, lo cual abastece con éxito la demanda del Delfinario la cual es de 19,200 m³/año (la planta produce 54,750 m³/año). Esto permite cumplir con la calidad demandada por los usuarios, dando prioridad a tecnologías que no requieren compuestos químicos para su operación y lavado y que además utilicen energía no contaminante o energías alternas, tal como sucede con la tecnología de Osmosis Inversa.

Análisis y Diseño de la Planta Desaladora Piloto

Para verificar la sustentabilidad de la planta antes de instalarla en sitio, se determinó la eficiencia del proceso de desalación aplicable al sitio seleccionado del Delfinario, mediante el software IMSDesing de Hydranautics, especializado en simulación y diseño de plantas desaladoras por Osmosis Inversa. Tabla 9 y 10.

Tabla 9. Etapa de Análisis de una planta desaladora empleando Hydranautics

Cationes	mg/L	Aniones	mg/L	Totales	
Ca	1,240.0	CO ₃	1.8	Sólidos Disueltos Totales	32,150 mg/L
Mg	1,448.0	HCO ₃	178.9	Conductividad Eléctrica	51,238 µS/cm
Na	8,970.0	SO ₄	2,263.4	Saturación CaSO ₄	54.1 %
K	179.9	Cl	17,868.3	Índice de Langelier	0.6
NH ₄	0.0	F	0.0	Fuerza iónica	0.679
Ba	0.0	NO ₃	0.0	Saturación BaSO ₄	0.0
Sr	0.0	B	0.0	Presión osmótica	337.1 psi
total (+)	575.64 meq	total (-)	554.19 meq	Temperatura: 25°C	pH 7

En la tabla 9, se muestran los datos de calidad del agua de alimentación (cationes y aniones), obteniendo así los índices de saturación y datos de conductividad y sólidos disueltos totales que permiten conocer la caracterización del agua de alimentación. En la tabla 10 se coloca la eficiencia del proceso, así como el tipo de membrana a utilizar, además se pone el dato de caudal de agua producto necesario, dando automáticamente el caudal de agua de alimentación y de rechazo.

Tabla 10. Etapa de Diseño de la planta desaladora y parámetros fisicoquímicos finales

Variables de diseño		Parámetros fisicoquímicos finales mg/L		
Disminución de flujo / año	7 %	Catión/Anión	Permeado	Concentrado
Incremento de paso de sales /año	7 %	Ca	1.29	509.76
Recuperación	45 %	Mg	1.50	644.28
Caudal permeado (m ³ /d)	150.0	Na	44.59	21,233.33
Flux promedio	14	K	1.12	393.33
Caudal de alimentación (m ³ /d)	333.3	CO ₃	0.00	0.00
Caudal concentrado (m ³ /d)	183.3	HCO ₃	1.33	633.33
H ₂ SO ₄ Ajuste de pH (mg/L)	24.6	Cl	74.04	35,257.14
SDI (Ajuste de pretratamiento)	0.8	SO ₄	2.35	1,119.04
Edad de las membranas (años)	0	SDT	126.20	58,351.80
Temperatura (°C)	25	pH	5.40	7.60

En la figura 4, se describe el diagrama del proceso de desalación, caudal (m³/h), presión (bar), y salinidad (ppm), para alimentación, producto y rechazo.

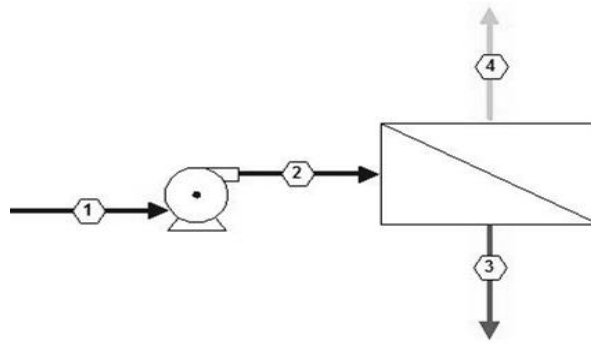


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de desalación por Osmosis Inversa

Con los datos fisicoquímicos de la obra de toma seleccionada y aspectos técnicos de la planta desaladora, se obtuvo una eficiencia de remoción de sales del 99.6%, un producto con una concentración de 126.2 mg/L de SDT y un agua de rechazo con una concentración de sales de 58,351.8 mg/L. Lo cual muestra una evaluación satisfactoria del proceso ya que cumple con las especificaciones de calidad y flujo requeridas por el Delfinario (Tabla 11).

Tabla 11. Variables analizadas en cada etapa del proceso.

Variable de Proceso	1	2	3	4
Caudal (m ³ /h)	13.9	13.9	7.6	6.2
Presión (Bar)	0.0	49.8	48.9	0.0
SDT (mg/L)	32,150.3	32,150.3	58,351.8	126.2

Plan de manejo para vertidos de plantas de plantas desaladoras.

Para la elaboración del plan de manejo para los desechos de la planta desaladora, se manejó como marco de referencia y comparación del rechazo de la planta desaladora del Delfinario contra el anteproyecto de norma próximo a publicarse en el Diario Oficial de la Federación que establece los límites permisibles, para vertidos de plantas desaladoras, ubicadas en la República Mexicana (Tabla 12).

Tabla 12. Límites permisibles propuestos en Anteproyecto de NOM-Mexicana

PARAMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	EMBALSES										
	RIOS		NATURALES Y ARTIFICIALES			AGUAS COSTERAS			HUMEDALES NATURALES (B)	POZOS DE INYECCION PROFUNDA	ALCANTARILLADO PUBLICO
	Uso en riego agrícola (A)	Uso público urbano (B)	Protección de vida acuática (C)	Uso en riegc agrícola (B)	Uso públicc urbano (C)	Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)	Recreación (B)	Estuario (B)			
	(I)	(I)	(I)	(I)	(I)	(I)	(I)	(I)	(I)	(I)	(I)
Arsénico*	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	23	1
Bicarbonatos	230	1.5	1	230	1	180	380	180	180	380	10
Cadmio*	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	-	1
Calcio	240	4	1.6	240	1.6	500	700	500	500	1100	20
Carbonatos	95	-	-	95	-	-	280	140	140	920	-
Cianuro*	2	2	2	2	2	2	3	2	2	-	2
Cloruros	265	165	80	265	80	23600	36000	23600	23600	51300	900
Cobre*	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	20
Cromo*	1.5	1	1	1.5	1	1	1.5	1	1	2	1
Demanda											
Bioquímica de oxígeno5	200	150	60	150	60	200	150	150	200	-	300
Flúor	1.4	1	1	1.4	1	1.6	-	1.6	1.6	3.5	-
Fosforo total	30	30	10	30	10	N.A	N.A	10	N.A	40	15
Magnesio	70	10	5	70	5	1600	2300	1600	1600	3400	60

Mercurio*	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.06	0.02
Nitrógeno total	60	60	25	60	25	N.A	N.A	25	N.A	-	85
Níquel*	4	4	4	4	4	4	4	4	4	8	8
Ph	5-8	5-10	-	5-8	5-10	5-10	8	5-10	5-10	4 – 10	5.5-10
Potasio	12	4	1.6	12	1.6	500	700	500	500	265	20
Plomo*	1	0.4	0.4	1	0.4	0.4	1	0.4	0.4	5	2
Sodio	100	90	45	100	45	13000	20000	13000	13000	29500	500
Sólidos disueltos totales (SDT)	1350	300	145	1350	145	43000	65000	43000	43000	94000	1600
Sólidos sedimentables (ml/l)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-	10
Sólidos suspendidos totales	200	125	60	125	60	200	125	125	200	-	450
Sulfatos (SO ₄)	340	25	10	340	10	3000	4800	3000	3000	7200	125
Zinc*	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	12
Temperatura °C	N.A	40	40	40	40	40	40	40	40	-	N.A

N.A. = No es aplicable (*) Medidos de manera total (I) Instantáneo
(A), (B) y (C): Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos.

Al realizar una comparación entre el rechazo de planta Delfinario y la tabla de parámetros permisibles del anteproyecto de Norma con la descarga de la planta desaladora se obtuvieron los siguientes resultados. Como el vertido del Delfinario se verterá a Mar abierto, se compara contra la columna de Recreación según anteproyecto de Norma.

Los parámetros de Calcio y Magnesio generados en el proceso de desalación se encuentran fuera del rango permisible del anteproyecto de Norma, por lo tanto se debe considerar un postratamiento para lograr la disminución de los parámetros o bien aumentar una desmineralización con pulidores después de Osmosis Inversa (Tabla 13).

Tabla 13.

Comparación del vertido de salmuera contra anteproyecto de NOM.

MUESTRA	mg/L							
	Calcio	Magnesio	Sodio	Potasio	Carbonatos	Bicarbonatos	Cloruros	Sulfatos
Propuesta de Norma	700.0	2,300.0	20,000.0	700.0	280.0	380.0	36,000.0	4,800.0
Delfinario	2,253.5	2,631.5	16,272.6	326.2	3.2	324.2	32,427.2	4,113.4

Plan de Manejo de Agua Producto que Cumpla NOM-127-SSA1-1994(2000)

Para la elaboración del plan vigilancia y monitoreo que verifique el grado de cumplimiento del proceso de desalación se utilizara la referencia de la NOM-127-SSA1-1994 (2000) enfocándose a la tabla 3 de dicha norma, la cual maneja los límites permisibles de los constituyentes químicos.

Una vez comparado el producto de la planta desaladora del Delfinario contra la NOM-127-SSA1-1994 (2000) se observa que todos los parámetros están dentro de norma y no existe necesidad de ningún proceso extra para lograr la calidad requerida para consumo humano (Tabla 14).

Tabla 14.

Comparación del agua producto contra NOM-0127-SSA1-1994(2000).

MUESTRA	mg/L							
	Calcio	Magnesio	Sodio	Potasio	Carbonatos	Bicarbonatos	Cloruros	Sulfatos
NOM-127	200.0	0.0	200.0	0.0	0.0	0.0	250.0	400.0
Delfinario	1.2	1.5	44.5	1.1	0.0	1.333	74.1	2.3

IV. Conclusiones

El desarrollo de las tecnologías de desalación ha logrado que se logren producciones de agua de forma más barata y eficiente, especialmente en procesos de desalación donde se utilizan membranas como el de Electrodiálisis Reversible y Osmosis Inversa, sin embargo una de las limitaciones que presenta la Electrodiálisis Reversible es que solo puede ser utilizada para desalar fuentes de agua salobre, a diferencia de la Ósmosis Inversa que tiene la función de desalar agua de fuentes salobres y marinas.

El estado comercial de estas tecnologías de desalación se encuentran completamente desarrolladas, existiendo más de 5,000 plantas en el mundo que utilizan el sistema por membranas, mientras que las tecnologías de desalación que utilizan sistemas térmicos, presentan más de 3,520 plantas instaladas.

La capacidad de desalinización de la Ósmosis Inversa es de 9,000 m³/d, mientras que la Electrodiálisis Reversible en 18,000 m³/d y los sistemas térmicos en 45,000 m³/d. El consumo energético promedio de la Ósmosis Inversa es de 3 kWh/m³, el de Electrodiálisis Reversible de 2 kWh/m³ y de los sistemas térmicos de 5 kWh/m³.

En México existen 435 plantas desaladoras de las cuales 392 son de Osmosis Inversa, lo que representa el 90.11% de las plantas instaladas, mientras que el 9.89% restante se divide entre procesos como Electrodiálisis Reversible,

Destilación, Destilación Solar, Compresión de Vapor y Destilación Flash Multietapa.

Entre las ciudades de Sonora que presentan mayores problemas de desabasto, Guaymas es la ciudad que presenta el mayor desarrollo turístico y comercial, por lo que atender la demanda actual y futura de agua resulta fundamental para asegurar el desarrollo de la zona, la demanda de agua de Guaymas para el año 2030 será de 14'308,183 m³/año y se tendrá una población de 156,802 habitantes. Las empresas seleccionadas en Guaymas, Sonora abarcan sectores fundamentales de la ciudad como lo son procesamiento de pescados y mariscos, el de servicios y turístico.

Después de un muestreo y análisis de calidad del agua en pozos playeros y/o tomas de agua de mar directa, se considera que el pozo playero ubicado en el Delfinario de Guaymas cumple con todos los requerimientos de calidad de agua para abastecer una planta desaladora, ya que no cuenta con presencia de microorganismos resultando 0 en Coliformes totales y Coliformes fecales (NMP/100 mL), la cantidad de metales pesados es mínima el cual con un sistema de desalación se pueden remover del agua de alimentación y su conteo fisicoquímico resulto más apto ya que se cuenta con una menor cantidad de Cloruros y Sodio con 17,868.3 y 8,970 mg/L respectivamente.

La planta desaladora piloto a utilizar en el sitio del Delfinario es de 100-150 m³/d, con este caudal se garantiza satisfacer la demanda de todas las actividades de este lugar inclusive el intercambio de agua de las piscinas donde se encuentran los delfines.

En la etapa de análisis la conductividad eléctrica obtenida con la calidad del agua de alimentación es de 51,238 µS/cm y sólidos disueltos totales en el orden de 32,150 ppm. Los índices obtenidos en esta etapa son: CaSO₄ 54.1%, Sílice 0%, además la presión osmótica es de 337.1 PSI.

En la etapa de Diseño se obtienen que la planta utilizará 2 tubos con 6 membranas, dando 12 membranas en total del modelo Sea Water C-4 (SWC4). La calidad del agua producto es de 126.2 ppm y un rechazo de 58,351.8 ppm.

Para las obras de abastecimiento y descarga se deberá de considerar las características de la obra de toma para el abastecimiento de la planta desalinizadora:

Características de la Obra de Toma

De agua de pozo (salobre o con intrusión salina). Antes de la instalación de la planta desalinizadora deberán realizarse estudios de geofísica para determinar la cantidad y calidad del agua existente en la zona, con la finalidad de garantizar el funcionamiento continuo de la planta y evitar abandonos de instalaciones.

Deberán instalarse sistemas de pretratamiento del agua, tales como filtros de arena, de cartucho, multimedia, acorde al tamaño de la planta desalinizadora que garantice su óptimo funcionamiento.

De toma de agua de mar directa. Las plantas desalinizadoras cuando no cuenten de agua suficiente en el subsuelo en cantidad y calidad, deberán de conectar la obra de toma de alimentación del mar a la planta desalinizadora, mediante tuberías adecuadas que no sean afectadas por la corrosión.

La obra de toma deberá estar en la franja de mar abierto más un mínimo de 100 metros de tuberías y deberá tener una profundidad de al menos 3 metros.

La obra de toma deberá de contar con cedazos acorde al tamaño nominal de la desalinizadora, que garantice su rendimiento en el proceso de pretratamiento o de filtración de materia orgánica y sólidos suspendidos y disueltos.

Características de la Obra de Descarga para los Vertidos de Salmuera

Cuándo se disponga el vertido de salmuera en aguas superficiales marinas, la tubería de descarga deberá de estar en sentido contrario a la obra de toma y en los casos donde no se cumpla el punto anterior, el punto de descarga del vertido deberá estar por lo menos a 500 metros de la boca de la obra de toma.

El vertido de salmuera deberá de hacerse en la franja de mar abierto más 200 metros de tuberías como mínimo, donde exista gran oleaje que permita la dispersión y disolución del vertido, además es deseable buscar corrientes para la disposición final que garantice la inmediata disolución.

El punto final de la tubería para el vertido de salmuera deberá estar a menos de 5 metros de profundidad y deberá contar con rehiletos de dispersión.

Cuando se disponga el vertido de salmuera en pozos de inyección profunda, la velocidad del fluido inyectado, para evitar daños en el sondeo o en la formación deberá hacerse con un límite máximo de 2.5 m/s, a menos que se pueda demostrar que no se dañará el sistema con velocidades superiores. Y deberán realizarse estudios hidrológicos subterráneos para determinar el adecuado confinamiento del sitio.

Cuándo se disponga el vertido de salmuera en estanques de evaporación, se recomienda buscar una alternativa de reuso, para obtener beneficios de dicho vertido.

V. Referencias

- APHA. AWWA. WPCF. (1992). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 18th Ed.* American Public Health Association, American Water Works Association Water Pollution Control Federation, USA. 800 p.
- AWWRC. (1995). *Field Manual For Water Quality Sampling.* Arizona Water Resources Research Center. Tucson, Az. USA. pp 6-37
- Cifuentes, L., R. Ortiz., & J. M. Casas. (2005). *Electrowinning of copper in a squirrel-cage cell with anion membrane*, *AIChE Journal* 51(8), 2273-2284.
- CONAGUA. (2001). *Compendio Básico del Agua en México.* Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2005). *Estadísticas del Agua en México.* Tercera Edición. Comisión Nacional del Agua y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- CONAGUA. (2006). *Estadísticas del agua en México.* Capítulo 3. Comisión Nacional del Agua.
- DOF. (2000). Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental. *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización.* Secretaria de Salud. Diario Oficial de la Federación. México, D.F.
- Fuentes, M., & Ramírez. A. I. (2005). *Desalting: a new reality for water supply in Mexico.* IDA International Desalation Association. Singapour.
- Gillam, W.S., & W. H. McCoy. (1994). *Principles of desalination.* Ed. Reverte, Barcelona. 566 p.
- González, R. (2006). *Estudio oceanográficos del area de Cochórit – Guasimas, en varias localidades del municipio de Empalme, en el estado de Sonora.* Informe final del proyecto CEA-FISE-DFI-06-074, elaborado para la Comisión Estatal del Agua, del estado de Sonora. Cd. Obregón, Sonora, México. 103 p.
- ICGSA. (2007). Ingenieros Cíviles y Geólogos S. A. *Estudio geohidrológico para el valle Aluvial del Río Yaqui.* ICGSA – SARH.

- IDA. (2005). *Desalting Plants Inventory*. Internacional Desalination Association. Madrid, España. 210 p
- IDA. (2007). *IDA Desalination Yearbook Report*. Internacional Desalination Association. Madrid, España. 208 p.
- INEGI. Censos de población 1980, 1990, 2000 y 2005. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Kedem, O., & Y, Maoz (Ed.). (1998). AWWA. *Agua, su calidad y tratamiento. Tratamiento del agua por procesos de membrana principios, procesos y aplicaciones*. American Water Works Association, Ed. Mc Graw-Hill, Madrid. pp 320-643.
- Medina, J. A. (2005). *Desalación de aguas salobres y de mar, osmosis inversa*. Editorial Mundi Prensa, Madrid, España. 385 pp.
- Mondaca, C. (2004). *The effectiveness of membrane systems for the separation of anolyte and catholyte in a lab-scale copper electrowinning cell based on reactive electro dialysis*, Minerals Engineering, 17, 803-809.
- Pankratz, T. & E. Yell (2007). *IDA Desalination Yearbook 2007-2008, water Desalination report*. Global water Intelligence. Media Analytics Ltd. UK.
- Powell, S. (1986). *Water Conditioning for Industry*. Editorial McGraw-Hill, New York. 631 p.
- Sorg, T. J. (1978). *Treatment technology to meet the interim primary drinking water regulation for organics*. Journal of the American Water Works Association, pp. 105-112.
- Sporn, P. (1996). *Fresh water from saline waters: The political social, engineering and economic aspects of desalination*. Ed. Mc Graw-Hill, Oxford. 450 p.
- Teruyuki, F., Fumio, A., Mutawa, H., NIiro, N., & Ito, Y. (2003). *Production Mechanism and Performance of Tubular Solar Still*. Memorias del IDA World Congress of Desalination and Water reuse. Bahamas. 159-165

Torrent, A. (1998). *Desalación por electrodiálisis reversible, Características del proceso y casos prácticos*. www.ionics.com

Valencia, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Editorial Mc Graw-Hill, Bogotá, 793 pp.

CAPÍTULO 5.

DESALINIZACIÓN EN MÉXICO, EL USO DE ENERGÍAS NO CONVENCIONALES PARA DESALINIZACIÓN EN COMUNIDADES RURALES.

Manuel Fuentes Díaz

SUMARIO: *El agua en México, Características de los mares mexicanos, Desalinización en México, Desalinización para comunidades rurales. Destilación solar tubular, Conclusiones, Agradecimiento, Referencias*

La escasez del agua ha obligado a algunas ciudades del mundo a obtener agua de fuentes alternativas como el reuso, agua de mar, lagunas saladas o de pozos salobres. Las plantas desalinizadoras son utilizadas en más de 100 ciudades alrededor del mundo. Los procesos comerciales que predominan la desalinización del agua es la ósmosis inversa y la destilación súbita multietapas (MSF). Estas dos tecnologías representan el 86% de toda la capacidad instalada en el mundo. Los sistemas de desalinización que emplean energías no convencionales como la eólica y solar acoplados a los sistemas convencionales de desalinización económicamente aún no son rentables. Sin embargo, a pesar de que existen muchas investigaciones al respecto no existe ningún sistema de desalinización pensado para comunidades rurales.

En México, la distribución espacial de la lluvia es muy irregular, el 50% del escurrimiento superficial se genera en el sureste en tan sólo el 20 % del territorio, mientras que en una porción del norte que abarca el 30% del territorio se genera sólo el 4 %, lo cual afecta la disponibilidad de agua superficial. El desequilibrio hidráulico de México es notable y sus asentamientos humanos no corresponden a las disponibilidades del agua: en el altiplano y la mesa del norte habita el 60% de la

población y sólo se cuenta con el 12% de agua. En el territorio mexicano, debido a su geografía y clima destacan dos grandes zonas de disponibilidad, la primera de ellas que comprende el sur y sureste y la segunda el norte, centro y noroeste del país. La disponibilidad natural media per cápita, en la primera de ellas es 7.3 veces mayor que en el resto del país. Sin embargo, en la zona norte, centro y noroeste se asienta el 77% de la población, se genera el 85% del PIB y sólo se tiene el 32% de la disponibilidad natural media. A partir de la década de los setentas ha venido aumentando sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados, de 32 en 1975, 36 en 1981, 80 en 1985, 97 en 2001, 102 en 2003 y 104 en el 2005. De éstos se extrae casi el 60% del agua subterránea para todos los usos.

Del centro al sur del país la mayor parte de la precipitación pluvial ocurre de Junio a Octubre (cinco meses), los otros 7 meses las precipitaciones son muy escasas, mientras que en el norte del país, las precipitaciones son muy raras e inconsistentes. La sobreexplotación y el tipo de suelo de los acuíferos que se encuentran en zonas costeras están causando problemas de intrusión salina como ocurre en el sureste de México. Actualmente, el país tiene 54 acuíferos con moderada salinidad y 16 con problemas serios de salinidad.

A Diciembre de 2005, en México existen 435 plantas desalinizadoras ubicadas en 320 sitios, el 32% de las plantas están fuera de operación, la capacidad instalada es de 311,377 m³/d. Los estados con mayor crecimiento de plantas desalinizadoras es el de Baja California, Baja California Sur y Quintana Roo. La mayoría de las plantas desalinizadoras pertenecen al sector turismo. Las principales causas de la mala operación de las desalinizadoras son por la falta de capacitación en la operación de las mismas, falta de asistencia técnica de los proveedores y alto costo de las refacciones.

En Instituto Mexicano de Tecnología del Agua se ha trabajado en el tema de desalinización empleando energías alternas desde 1998. En el 2004, se desarrolló un prototipo de destilador tubular solar (DTS), para producir agua dulce a partir de agua de mar o salobre a nivel familiar, ocupando una menor área que los sistemas de destilación solar convencionales, produciendo la cantidad suficiente de agua para beber para una familia de 5 integrantes.

El Agua en México

México tiene una superficie de 1,967,183 kilómetros cuadrados, en la que confluyen dos grandes regiones biogeográficas: la neártica y la neotropical, lo que da como resultado diferentes climas y diversidad de especies en flora y fauna. De la superficie total del país, el 52% es árido y semiárido, el 13% es trópico seco, el 20% es templado y el 15%, trópico húmedo. Existen ecosistemas con grave escasez de agua que limitan su extracción y otros en donde se requieren regular las condiciones de abundancia.

El país tiene una precipitación media anual de 772 milímetros, lo cual equivale a 1,528 kilómetros cúbicos, existe una evaporación media anual de 1095 km³/año y una recarga de acuíferos de 66 km³/año (Figura 1).

La lluvia se concentra en los meses de junio a septiembre. Además de las variaciones mensuales, existen variaciones anuales con periodos extraordinarios de sequía que duran de uno a tres años. De igual forma, se presentan fenómenos meteorológicos extremos como los ciclones tropicales, las granizadas y nevadas extraordinarias.

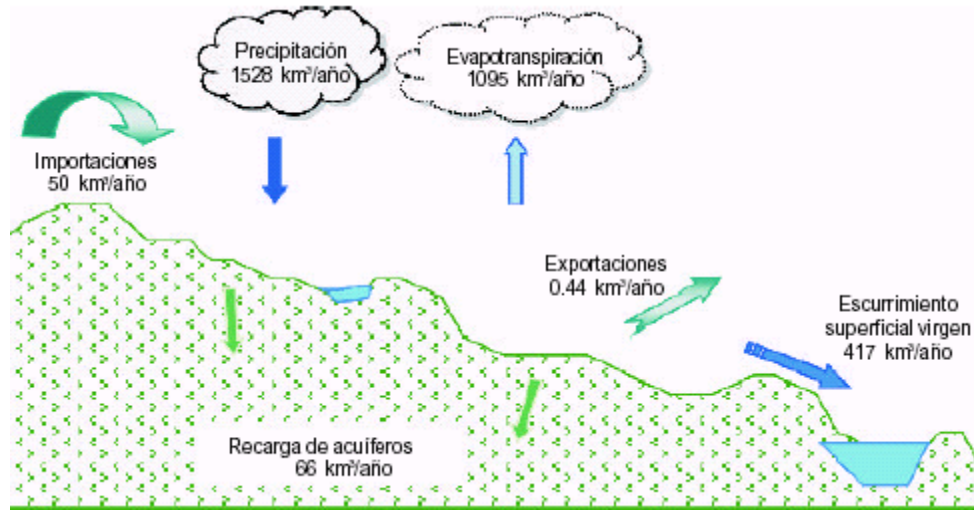


Figura 1. Cantidades de agua que se pierden y recuperan en México (CNA, 2001).

Del agua que se precipita sobre el territorio nacional, el 27 % escurre por corrientes superficiales en las 13 regiones hidrológicas administrativas que conforman el país.



Figura 2. Regiones hidrológico-administrativas de la CNA (CNA, 2006)

Otra parte de la lluvia se infiltra y recarga los acuíferos, estimándose un volumen de renovación anual de 66 kilómetros cúbicos.

La distribución espacial de la lluvia es muy irregular, el 50% del escurrimiento superficial se genera en el sureste y este sólo representa el 20 % del territorio, mientras que en una porción del norte que abarca el 30% del territorio se genera sólo el 4%, lo cual afecta la disponibilidad de agua superficial (Figura 2). El desequilibrio hidráulico de México es notable y sus asentamientos humanos no corresponden a las disponibilidades del agua: en el altiplano y la mesa del norte habita el 60% de la población y sólo se cuenta con el 12% de agua.

En el territorio mexicano, debido a su geografía y clima destacan dos grandes zonas de disponibilidad, la primera de ellas que comprende el sur y sureste y la segunda el norte, centro y noroeste del país. La disponibilidad natural media per cápita, en la primera de ellas es 7.3 veces mayor que en el resto del país. Sin embargo, en la zona norte, centro y noroeste se asienta el 77% de la población, se genera el 85% del PIB y sólo se tiene el 32% de la disponibilidad natural media.



Fuente: Estadísticas del agua en México, CNA 2006.

Figura 3. Disponibilidad de agua a nivel nacional.

El crecimiento de la población y de las actividades económicas, han disminuido la disponibilidad per cápita del agua. En el lapso comprendido entre los años 2000 y 2005 la disponibilidad se redujo 5.5% al pasar de 4,841 a 4,573 m³/hab-año.

La disponibilidad natural media de agua considera únicamente el agua renovable; es decir, la lluvia que se transforma en escurrimiento superficial y en recarga de acuíferos; la disponibilidad determinada conforme a la norma NOM-011- CONAGUA-2000 resulta de sustraer las extracciones de agua para los diferentes usos (entre otros conceptos) a la disponibilidad natural media.

En promedio, en el país se utiliza el 16% del volumen de disponibilidad natural media de agua; sin embargo, en la porción norte se utiliza más del 40%, lo que se considera por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), como una fuerte presión sobre el recurso hídrico.



Figura 4. Grado de presión sobre el recurso hídrico. Nota: Grado de presión sobre el recurso hídrico = Volumen total de agua concesionado / Disponibilidad natural media de agua.

Fuente: Estadísticas del agua en México, CNA 2006.

Se han identificado cerca de 650 cuerpos de agua subterráneos (CNA, 2000) distribuidos en el territorio nacional, de los cuales 459 se consideran como acuíferos regionales por su extensión, capacidad e importancia relativa. Se estima una extracción total de 24 km³ anuales a través de aproximadamente 140 mil aprovechamientos subterráneos. A partir de la década de los setentas ha venido aumentando sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados, de 32 en 1975, 36 en 1981, 80 en 1985, 97 en 2001, 102 en 2003 y 104 en el 2005. De éstos se extrae casi el 60% del agua subterránea para todos los usos.

Hasta finales de 2005, en el Diario Oficial de la Federación DOF se ha publicado la disponibilidad media anual de agua de 202 acuíferos, determinada conforme a la norma oficial mexicana NOM-011-CNA-2000, elaborada para ese fin.

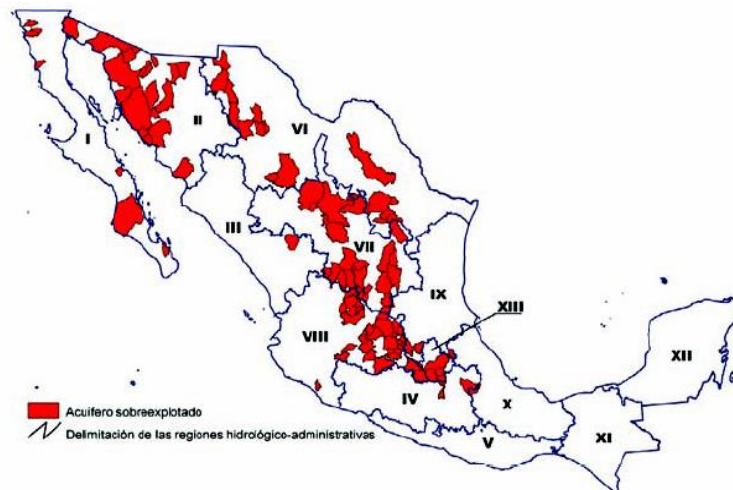


Figura 5. Acuíferos sobreexplotados (situación a 2005).

Fuente: Subdirección General Técnica, CONAGUA

Existen 17 acuíferos con problemas de intrusión marina ubicados en los estados de Baja California, Baja California Sur, Colima, Sonora y Veracruz. Entre éstos se encuentran Maneadero y San Quintín en Baja California, Santo Domingo en Baja California Sur; Caborca, Costa de Hermosillo, Valle de Guaymas y San José de Guaymas en Sonora.

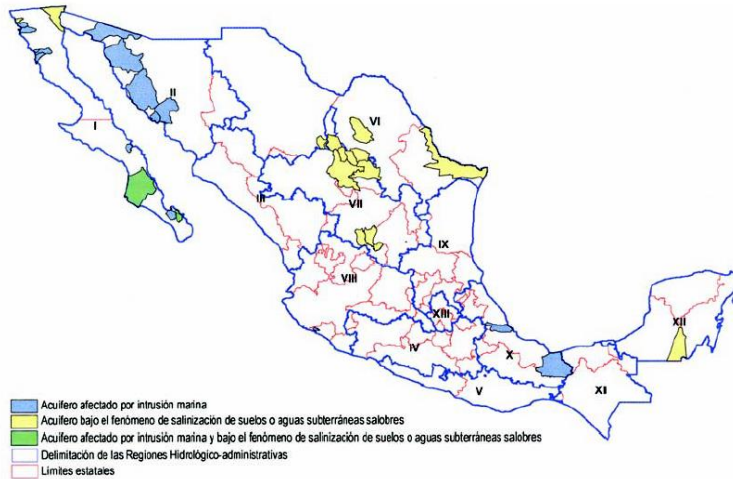


Figura 6. Acuíferos con intrusión marina y/o bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres (situación a 2005).

Fuente: Subdirección General Técnica, CONAGUA.

México tiene lagos y lagunas con una capacidad de almacenamiento de 14 kilómetros cúbicos, y se han construido presas que almacenan 150 kilómetros cúbicos, la suma de ambos equivale al 39% del escurrimiento medio anual.

Estudios más recientes elaborados por la CNA (2001), muestran cómo ha ido disminuyendo la disponibilidad por habitante por año, y proyectando hasta el año 2025. De acuerdo a la Figura 7 la disponibilidad por habitante disminuirá de 11,500 desde 1955 a 3,500 m³/ habitante/año al año 2025.

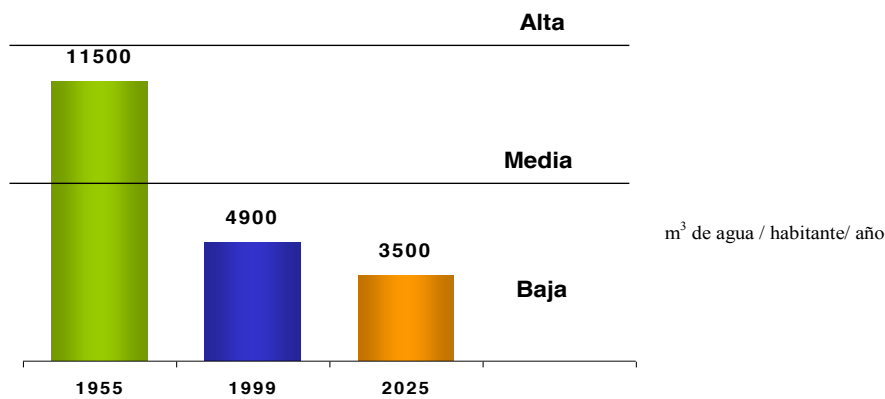


Figura 7. Tendencias de disponibilidad de agua en México (CNA, 2001).

Características de los Mares Mexicanos

México cuenta con más de 11 mil kilómetros de litorales, alrededor de 68% de estos corresponde a las costas e islas del océano Pacífico y Golfo de California, y 32% a las costas, islas y cayos del Golfo de México y mar Caribe. Además la zona marítima mexicana cuenta con 500 mil kilómetros cuadrados de plataforma continental; 16 mil kilómetros cuadrados de superficie de estuarios y cerca de 12,500 km² de lagunas costeras. Lo anterior, junto a derechos sobre amplias zonas marítimas, le asegura a México una riqueza potencial que tienen pocos países en el mundo. En agua salada/salobre el área se estima en poco más de 2 millones de hectáreas; de éstas, hay 450 mil propicias para el cultivo del camarón y 1.6 millones para otras especies. Se debe considerar también el potencial aprovechamiento de los acuíferos salobres intercontinentales (superficiales y subterráneos) para producir agua potable.

La desalinización se refiere al proceso de tratamiento para remover las sales del agua, ésta puede realizarse por varias vías, el objetivo es obtener agua potable a partir de agua salobre o de mar. El agua del mar es importante para la pesca y transportación, pero es demasiado salada para el ser humano y para la agricultura. Las técnicas de desalinización han incrementado la cantidad de agua dulce para el uso municipal, industrial y turístico. Hasta hace poco el agua con concentraciones por debajo de los 1,000 mg/L eran consideradas como aceptables para abastecer a una comunidad. Esta limitación, algunas veces definían el tamaño y ubicación de las comunidades alrededor del mundo. Era muy difícil establecer comunidades en zonas donde no existieran zonas de abastecimiento de agua dulce. La aplicación de las tecnologías de desalinización en los últimos 50 años, ha cambiado la situación de varias ciudades, industrias, comunidades, ya que estas se han desarrollado y crecido en zonas áridas con poca disponibilidad de agua dulce, y donde el agua salobre o de mar está disponible.

México tiene una gran variedad de ambientes acuáticos distribuidos en sus diferentes cuencas hidrológicas, así como en sus vastas extensiones del margen litoral del Pacífico Mexicano, Mar de Cortés, Golfo de México, Caribe Mexicano y sus diversas islas (Durón et. al., 2004).

Desalinización en México

Como ya se mencionó en los próximos años, nuestro país tendrá una baja disponibilidad de agua dulce (3 a 15 m³ diarios), de ahí que el conocimiento y la puesta en marcha de técnicas para desalinizar agua de mar resulten de particular importancia. Sin embargo, el problema no se resuelve únicamente con importar grandes y costosos equipos del extranjero, sino que resulta imprescindible la capacitación del personal idóneo a diferentes niveles de organización.

A pesar de que en diversos estados funcionan plantas desalinizadoras, un ejemplo de la situación por la que atraviesan las plantas en México es el caso de Quintana Roo. En este estado hay varias plantas de ósmosis inversa, como las de Xcalak, cerca de Chetumal, Isla Contoy y Cozumel. Prácticamente todas ellas están abandonadas, ya sea por falta de refacciones (en la actualidad para este proceso más de 50% del equipo es de importación), o porque realmente nunca falta agua en las comunidades donde se instalaron.

Resulta entonces fundamental que el gobierno, a través de las instituciones competentes, emita políticas y normas sobre la tecnología para desalinizar agua de mar, de acuerdo con las circunstancias de nuestro país.

De acuerdo a las modificaciones que se hicieron en la ley de aguas nacionales en el año de 2004, la desalinización está contemplada en esta ley y menciona que es objeto de concesión en su artículo 17 dice textualmente:

ARTÍCULO 17. Es libre la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas nacionales superficiales por medios manuales para uso doméstico conforme a la fracción LVI del Artículo 3 de esta Ley, siempre que no se desvíen de su cauce ni se produzca una alteración en su calidad o una disminución significativa en su caudal, en los términos de la reglamentación aplicable.

No se requerirá concesión para la extracción de aguas marinas interiores y del mar territorial, para su explotación, uso o aprovechamiento, salvo aquellas que tengan como fin la desalinización, las cuales serán objeto de concesión. Artículo reformado DOF 29-04-2004

En el año 2001 el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, realizó el primer inventario de plantas desalinizadoras para la Comisión Nacional del Agua. La siguiente tabla muestra el número de plantas desalinizadoras por estado y capacidad instalada.

Tabla 1.
Inventario de plantas desaladoras a diciembre de 2001

Estado	Plantas desaladoras	% Nacional	Opera		Capacidad instalada m ³ /d	Capacidad que opera m ³ /d
			Sí	No		
Baja California	10	5.8%	7	3	9,540	8,040
Baja California Sur	38	22.2%	32	6	8,979	3,346
Campeche	2	1.2%	2	0	3,120	2,247
Coahuila	7	4.1%	2	5	78	31
Durango	24	14.0%	9	15	650	374
Guerrero	4	2.3%	2	2	2,000	900
Nuevo León	2	1.2%	2	0	325	325
Oaxaca	1	0.6%	1	0	13,478	13,478
Q. Roo	76	44.4%	57	19	27,058	23,266
SLP	1	0.6%	1	0	60	5
Sonora	5	2.9%	4	1	471	80
Tamaulipas	1	0.6%	1	0	1,728	363
Total nacional	171	100%	118	53	67,487	52,455

En el 2006, se actualizó el inventario de plantas desalinizadoras, la tabla 2 presenta los principales resultados

Tabla 2.

Inventario Nacional de plantas desalinizadoras a diciembre de 2006

Estado	Sitios donde hay plantas desalinizadoras	Número de unidades	% Nacional	Operan		Capacidad máxima instalada m ³ /d
				Sí	No	
Baja California	23	38	8.74%	24	14	51,938
BCS*	71	73	16.78%	53	20	36,971
Campeche	8	19	4.37%	14	5	5,456
Coahuila	31	33	7.59%	23	10	7,668
Colima	17	18	4.14%	2	DES	2,856
Edo. México	3	4	0.92%	2	2	7,000
D.F.	14	17	3.91%	12	5	95,471
Durango	26	26	5.98%	13	13	868
Guerrero	6	6	1.38%	3	3	2,355
Jalisco	3	4	0.92%	3	1	2,865
Morelos	2	21	4.83%	21		110
Nuevo León	5	5	1.15%	5		2,847
Oaxaca	1	4	0.92%	4		14,256
Q. Roo**	79	124	28.51%	73	51	53,339
SLP	1	1	0.23%	1	0	60
Sonora	16	22	5.06%	15	7	9,349
Tamaulipas	4	4	0.92%	2	2	5,100
Veracruz	9	15	3.45%	11	4	12,167
Yucatán	1	1	0.23%	1		700
Total nacional	320	435	100%	282	137	311,377

Fuente: Elaboración propia y del Inventario 2005 de la IDA

Se observa que del 2001 al 2006 hubo un crecimiento de casi cuatro veces del número de plantas desalinizadoras. La capacidad instalada se incrementó más de 5 veces al pasar de 781 L/s en el 2001 a 3,604 L/s en el 2006. En el 2006, entró en operación la primera planta desalinizadora municipal más grande del país con una capacidad nominal de 200 L/s, en Los Cabos, Baja California. Existen varias plantas desalinizadoras en proyecto principalmente en el norte del país.

En México el sistema más utilizado para desalinizar agua es la ósmosis inversa, con un 76% de las plantas según el inventario.

Desalinización Para Comunidades Rurales

Todos los esfuerzos se han enfocado a obtener agua potable a partir de agua de mar o aguas salobres, empleando los sistemas convencionales o sistemas convencionales acoplados a equipos que utilizan energías no convencionales como la solar o la eólica.

El uso directo de energía solar para desalinizar agua ha sido investigado y empleado por algún tiempo. Durante la Segunda Guerra Mundial, se realizó mucho trabajo en el diseño de pequeños destiladores para uso en botes salvavidas. Este trabajo continuó después de la guerra y un gran número de dispositivos se diseñaron y probaron.

Estos dispositivos generalmente imitan parte del ciclo hidrológico natural en el hecho de que los rayos solares calientan el agua salada y aumentan la producción de vapor de agua (humedad). Posteriormente se condensa el vapor de agua en una superficie fría y el condensado se recolecta como agua fresca. Un ejemplo de este tipo de procesos es el destilador que semeja a un invernadero, en el cual el agua salada se calienta en un recipiente y el vapor de agua se condensa en el techo de cristal que cubre el recipiente (Figura 8).



Figura 8. Destilación solar tipo caseta en México (Buros, 2000).

Se han ideado variaciones sobre este tipo de destilador solar en un esfuerzo por incrementar la eficiencia, pero todos ellos comparten las siguientes dificultades lo cual restringe el uso de esta técnica para producir agua dulce a gran escala:

Se requiere de grandes superficies para coleccionar la energía solar. Los costos de capital son elevados. El clima puede ocasionar daños al dispositivo.

Por regla general, se sabe que este tipo de destilador requiere de un área de colección de energía solar de aproximadamente un metro cuadrado para producir 4 litros de agua por día. Por lo tanto, para una planta que produzca 4,000 m³/d, se requiere una superficie de al menos 100 hectáreas. Esta gran superficie puede resultar muy difícil de conseguir si la planta se va a ubicar cerca de una ciudad en donde la tierra es escasa y cara.

Los destiladores en sí son costosos en su construcción y aunque la energía térmica puede resultar gratis, se requiere de energía adicional para bombear el agua hacia adentro y hacia fuera de la instalación. Además, se requiere un mínimo de atención durante su operación y mantenimiento a fin de mantener la estructura, prevenir incrustaciones y reparar los cristales rotos o las fugas de vapor.

Este tipo de destiladores se han empleado para desalinizar agua en pequeña escala para familias o pequeñas comunidades en donde la energía solar y el bajo costo de la mano de obra son abundantes, pero no así la electricidad.

Un destilador bien construido puede ser bastante resistente y se han reportado algunos que han operado exitosamente por 20 años o más. La clave es contar con usuarios que estén realmente involucrados con el éxito de su funcionamiento y que estén adecuadamente entrenados en su construcción, operación y reparación.

Se han realizado esfuerzos para mejorar sus características. En muchos casos, las modificaciones han incrementado la producción por unidad de área, pero también algunos cambios han aumentado las complicaciones en su operación y mantenimiento en pequeñas comunidades. Como sucede con cualquier dispositivo que permita suministrar agua a pequeñas comunidades, la tecnología sólo es parte de la solución. Para que un sistema de abastecimiento de agua tenga éxito debe tomar en cuenta la cultura, tradición y las condiciones locales de la comunidad que lo va a emplear.

Una amenaza para la permanencia de estos dispositivos surge cuando la economía del sitio en que está instalado se ha desarrollado a tal punto que la tierra que ocupan se vuelve muy valiosa como para seguirla utilizado para producir agua o cuando la mano de obra se vuelve más costosa.

Existen dos grandes grupos de los sistemas de desalinización basados en tecnología solar térmica: A. Desalinización solar térmica directa, en la que se produce el destilado directamente en el colector solar, es decir, el colector y el destilador están integrados, como es el caso de los destiladores solares. B. Desalinización solar térmica indirecta, en la que se emplean dos subsistemas, uno para la captación solar de energía, y otro para efectuar la desalinización. Ejemplo de este tipo son las unidades de destilación térmica (MED, MSF, etc.) acopladas a un sistema solar térmico.

Un destilador solar (o solar still) es un sistema de desalinización basado en la utilización de la energía solar térmica para la obtención de agua a través del

efecto de humidificación. El vapor de agua contenido en el aire húmedo es posteriormente condensado, con lo que se obtiene agua dulce, simulando así en pequeña escala el fenómeno natural de la formación de las nubes y de la lluvia. Las dos partes fundamentales que componen el diseño básico de un destilador solar son la piscina o estanque y la cubierta. Estos equipos no se emplean para la producción de grandes cantidades de agua desalada, a causa de que presentan una baja producción de destilado por unidad de superficie del estanque. Presentan rendimientos típicos del 30%. La producción específica diaria de un destilador solar simple tipo batea está entre 1 y 4 litros por cada m² de superficie. Si se desean producciones superiores que puedan cubrir las demandas de mayores núcleos de población u otras aplicaciones, se debe considerar la desalinización solar térmica indirecta por su mayor capacidad.

Como se mencionó la distribución del agua potable en México no es la suficiente para abastecer gran parte de las zonas rurales, principalmente en las costas del país. El tipo de suelo y la sobre explotación es la principal causa de que los acuíferos de agua dulce se contaminen con agua marina y ocasiones la intrusión llega de dos a cinco kilómetros tierra adentro en temporada de estiaje, inclusive en zonas donde la lluvia es abundante como es el caso de toda la rivera Maya en el estado de Quintana Roo. Actualmente, las poblaciones rurales que se encuentran en dicho corredor únicamente cuentan con agua salobre para todos sus usos y cuando hay recursos, compran el agua de garrafón para beber o cocinar. En las costas de la zona norte, principalmente en el pacífico mexicano, además de la intrusión salina la escasez es otro factor que complica el problema. En el centro del país, existen comunidades y municipios que además de la escasez, el agua contiene altas concentraciones de sales en forma de carbonatos, bicarbonatos y algunos metales como el arsénico.

Destilación Solar Tubular

Los primeros destiladores solares fueron desarrollados en la Universidad de California en el año de 1952 y operaron hasta el año 1956, estos fueron elaborados con material de vidrio y tapas de madera, obteniendo eficiencias de $8.14 \text{ L/m}^2\text{-d}$, 2 veces mayor que el destilador de batea, considerando únicamente el área útil del reactor y con precalentamiento. En el año 2003, un grupo de japoneses desarrollaron un proyecto trabajo en Arabia Saudita retomando los destiladores solares tubulares, pero el material empleado fue el PVC, el estudio estuvo enfocado a parámetros termodinámicos del reactor y se obtuvieron eficiencias de $2.5 \text{ L/m}^2\text{-d}$, sin precalentamiento. La ventaja de estos reactores es el poco espacio que ocupan y el bajo mantenimiento que requieren para producir agua baja en sales a partir de agua salobre (concentraciones hasta $10,000 \text{ mg/L}$ como sólidos disueltos) (Figura 9).

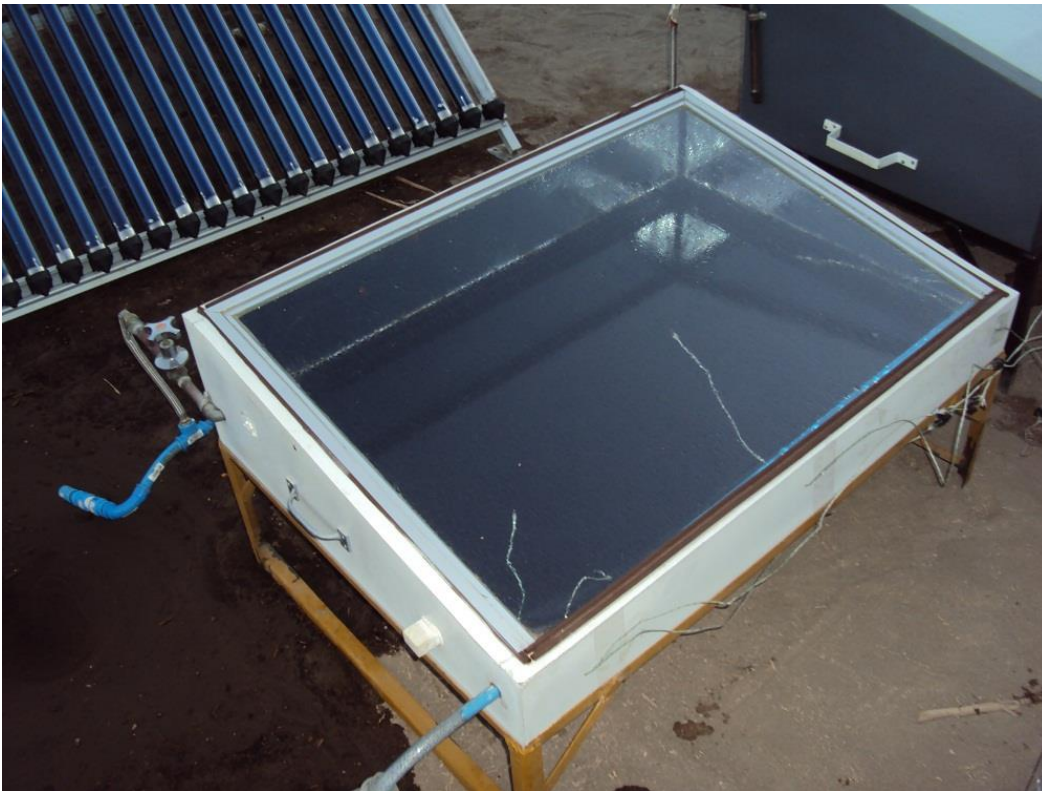


Figura 9. Destiladores solares tubulares (TSS en inglés), (Fukuhara, 2003).

En el año 2004, en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua iniciaron los trabajos de investigación para la aplicación de este tipo de destiladores para comunidades rurales. Se desarrollaron varios tipos de destiladores solares; empleando diferentes materiales en el interior de cada destilador, se colocó una canaleta de acero galvanizado recubierto con pintura epóxica curada con poliamida grado alimenticio (para uso en agua dulce o salada o para ambientes severos).

Así mismo, se construyó un calentador solar, el cual tiene tres funciones; aumenta en casi el doble la producción de destilado, proporcionará de agua caliente a la familia durante el día (estará en función del volumen del contenedor de agua salobre o salada) y ayudará a obtener agua baja en sales durante la noche.

Los destiladores se alimentan en continuo, utilizando un tanque de abastecimiento con un volumen de 450 L. Éste contenía una solución salina artificial con una concentración promedio de 10 g/L, utilizando sal de mar mezclada con agua potable de la llave. El agua salobre del tanque es alimentada al calentador solar y de ahí se distribuye a los destiladores. Se utilizó un destilador de escalera como testigo. El arreglo de los destiladores se presenta en la (Figura 10).



Figura 10. Arreglo de los diferentes destiladores solares evaluados

La producción máxima alcanzada en estos destiladores fue de 11.6 L/m² d como área útil (6.62 L/m² d, como área total). La producción promedio con precalentamiento es de 2 L/m² d (considerando área total), lo anterior indica que para producir 10 litros de agua es necesario construir 47 destiladores solares que ocuparían un área no mayor a los 6 m². El costo de cada reactor es de aproximadamente 2.5 USD.

Estos destiladores serán probados por una familia en una comunidad rural para que se involucren en el proyecto y exista una aceptación del mismo. Se han determinado los sitios probables para aplicar en todo el país y la siguiente tabla presenta los resultados.

Tabla 3.

Comunidades en el país donde se podría aplicar la destilación solar tubular

Estado	Número de localidades	Localidades para analizar
Coahuila	51	-
Chiapas	10	1
Durango	77	-
Guerrero	23	12
Michoacán	25	15
Oaxaca	89	22
Quintana Roo	4	-
Sinaloa	6	6
Veracruz	27	19
Yucatán	5	1
Total	317	76

En el caso de las localidades para analizar, es necesario hacer un estudio de prefactibilidad ya que existen fuentes de agua cerca de la zona, que podría ser de agua dulce, sin embargo para éste estudio no se descartan. Sin embargo existen 241 localidades rurales donde podría utilizarse este sistema.

Conclusiones

El país tiene una precipitación media anual de 772 milímetros, lo cual equivale a 1,528 kilómetros cúbicos, existe una evaporación media anual de 1095 km³/año y una recarga de acuíferos de 66 km³/año. La lluvia se concentra en los meses de junio a septiembre. Además de las variaciones mensuales, existen variaciones anuales con periodos extraordinarios de sequía que duran de uno a tres años.

La distribución espacial de la lluvia es muy irregular en el país, el 50% del escurrimiento superficial se genera en el sureste que representa tan sólo el 20 % del territorio, mientras que en una porción del norte que abarca el 30% del territorio se genera sólo el 4% de escurrimientos, lo cual afecta la disponibilidad de agua superficial. El desequilibrio hidráulico de México es notable y sus asentamientos humanos no corresponden a las disponibilidades del agua: en el altiplano y la mesa del norte habita el 60% de la población y sólo se cuenta con el 12% de agua.

En el territorio mexicano, debido a su geografía y clima destacan dos grandes zonas de disponibilidad, la primera de ellas que comprende el sur y sureste y la segunda el norte, centro y noroeste del país. La disponibilidad natural media per cápita, en la primera de ellas es 7.3 veces mayor que en el resto del país. Sin embargo, en la zona norte, centro y noroeste se asienta el 77% de la población, se genera el 85% del PIB y sólo se tiene el 32% de la disponibilidad natural media.

El crecimiento de la población y de las actividades económicas, han disminuido la disponibilidad per cápita del agua. Entre los años 2000 y 2005 la disponibilidad se redujo 5.5% al pasar de 4,841 a 4,573 m³/hab-año. En promedio, en el país se utiliza el 16% del volumen de disponibilidad natural media de agua; sin embargo, en la porción norte se utiliza más del 40%, lo que se considera por la ONU, como una fuerte presión sobre el recurso hídrico.

Existen 17 acuíferos con problemas de intrusión marina ubicados en los estados de Baja California, Baja California Sur, Colima, Sonora y Veracruz. Entre éstos se encuentran Maneadero y San Quintín en Baja California, Santo Domingo en Baja California Sur; Caborca, Costa de Hermosillo, Valle de Guaymas y San José de Guaymas en Sonora.

La Ley de Aguas Nacionales original no contemplaba la desalinización y mucho menos que estaría sujeta a concesión. La reforma hecha a la Ley de aguas en el año 2004 en su artículo 17 habla de la explotación del agua de mar o aguas marinas interiores y que serán sujetas a concesión si son utilizadas con fines de desalinización. Es necesario ampliar las leyes para lo que se refiere a las descargas de salmueras en cuerpos superficiales o subterráneos ya que a la fecha no existe ningún control al respecto.

En el 2001 había 171 plantas desalinizadoras en el país con una capacidad instalada de 67,487 m³/d al 2006 hubo un crecimiento de casi cuatro veces del número de plantas desalinizadoras (435). La capacidad instalada se incrementó más de 5 veces al pasar de 781 L/s en el 2001 a 3,604 L/s en el 2006. En el 2006, entró en operación la primera planta desalinizadora municipal más grande del país con una capacidad nominal de 200 L/s, en Los Cabos, Baja California. Existen varias plantas desalinizadoras en proyecto principalmente en el norte del país.

Los destiladores solares no son utilizados para abastecer a grandes núcleos de población debido a sus bajos rendimientos y se recomienda la aplicación con los sistemas convencionales (uso indirecto de las energías no convencionales). La producción específica diaria de un destilador solar simple tipo batea está entre 1 y 4 litros por cada m² de superficie.

La destilación tubular solar alcanza eficiencias máximas hasta 11.6 L/m² h como área útil y de 6.6 L/m²-h como área total. En promedio anual estos reactores

obtienen eficiencias de 2.6 L/m²-h (área útil). Para producir 10 L de agua para beber considerando una familia de 5 integrantes y que cada uno utilice 2 L al día es necesario construir 47 destiladores que ocuparían un área menor a los 6 m² utilizándose el techo de la vivienda para colocar los destiladores solares.

El costo del destilador solar con materiales de fácil adquisición es de 2.5 USD, los mayores costos provienen del calentador solar y de la instalación hidráulica.

Realizando un análisis a nivel nacional 241 localidades rurales ubicadas principalmente en la costa son factibles para aplicar este sistema.

Agradecimiento

Dr. Bermúdez por su valiosa información de plantas desalinizadoras en la Península de Baja California, M.I. César Calderón, Molgora, M.I. Arturo González H, Dra. Sofía Garrido Hoyos, M.I. Juan M. Chacón, M.A. Leticia Montellano Palacios, M.I Antonio Ramírez G, Dr. Aldo I. Ramírez Orozco, por su apoyo en la realización de la investigación y desarrollo de los trabajos.

Referencias

Arreguín, F. (2000). *Desalinización del agua. Ingeniería Hidráulica en México*. 15 (1): 27-49.

Buros O.K. (2000). *The ABCs of Desalting. International Desalination Association*, 2nd Ed. USA.

Comisión Nacional del Agua CONAGUA. (2006). *Estadísticas del agua en México, Capítulo 3. Situación de los recursos hídricos. Cap. 4. Usos del agua e infraestructura* www.cna.gob.mx

Comisión Nacional del Agua (2001).

Comisión Nacional del Agua (CNA) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2004). *Compendio Básico del Agua en México Estadísticas del Agua en México* (2^{da} ed.).

Comisión Nacional del Agua (CNA) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2005). *Estadísticas del Agua en México* (3^{ra} ed.).

INEGI. Mapa digital de México. www.inegi.gob.mx

Fuentes, M., Ramírez, A., & Ramírez, A. (2005). *Desalting: a new reality for water supply in México*. IDA International Desalation Association. Singapur.

Teruyuki, F., Fumio, A., Mutawa, H., NIiro, N., & Ito, Y. (2003). *Production Mechanism and Performance of Tubular Solar Still*. Memorias del IDA World Congress of Desalination and Water reuse. Bahamas. 159-165.

CAPÍTULO 6.

ION EXCHANGE MEMBRANE PAIR EVALUATION FOR ELECTRODIALYTIC DENITRIFICATION AND ACID-BASE RECLAMATION

Federico Castañeda Zaldivar
López García Ulises Miguel
Torres González Julieta
Terol Villalobos Ivan
Morales Hernández Jorge
Antaño López René

Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica s.c.
Subdirección de Investigación.
Tel: +524422116031
Fax: +524422116001
e-mail: fcastaneda@cideteq.mx

SUMARIO: I. *Introduction*, II. *Analytical Methods*,
III. *Results and Discussion limiting current*
IV. *Conclusions*, V. *References*

Abstract

Electrodialysis (ED) of NaNO_3 solutions to in one hand, denitrify wastewaters/brackish waters and in the other hand, to produce nitric acid and sodium hydroxide was performed to stress the role of the membrane pair as a unit. A total of 9 membrane pairs were tested. Each membrane pair was evaluated by limiting current, nitrate removal rate, nitrate, sodium and proton leakage, Current efficiency (CE) and Specific Power Consumption (SPC). Results show that membrane pair performance is multifactorial dependent. The membrane pair ranking in limiting current is not kept in ions leakage and both rankings are not the same as for Current Efficiency (CE) or SPC, all them depending on the kind of associated membrane and flow rate.

Keywords: *Electrodialysis, Ion exchange membranes, Nitrate removal, Nitric acid, Caustic soda.*

I. Introduction

The removal of nitrate from water sources that results from the use of fertilizers, industrial wastewater and human or animal waste disposal has been of great concern (Soares, Su; 2000, 2004). For instance, certain acidic wastewater, which is produced from the etching and rinsing processes in electronic, mechanical, and metal-plating industries, contains a substantially large amount of nitrate due to the use of nitric acid. Attempts in using physicochemical or biological methods have been made to remove nitrate from water or wastewater. Treatment methods such as absorption, ion exchange, electrodialysis, RO, Donnan dialysis, nano and ultrafiltration, biological denitrification and combination of two or more of these methods have been the object of many studies (Wang, Kima; 2003, 2007).

The biological denitrification is successfully applied to denitrification process. However, the biological denitrification needs a carbon source (e.g., methanol) and the removal rate is highly affected by the aqueous chemistry.

Membrane separation could be an alternative to the biological wastewater treatment for stainless steel manufacturers. RO and NF membranes can be applied for nitrate separation at the high concentrations found in these kind of operations (Schhoeman, Molinari; 1996, 2001). Electrodialysis is more convenient when it comes to the acid regeneration in pickling operations. For economic and environmental reasons, splitting of dissolved nitrate salts into caustic and nitric acid is advantageous. These products may be recycled upstream in the process or reused elsewhere after further concentration by evaporation, etc. Electrodialysis (ED) was used to treat solutions containing nitrate and has been investigated in many studies (Chiao, Gain; 1991, 2002). The principle of this operation lies on ion-exchange membranes characteristics to split nitrate salt and to produce acid and base. In this regard, we cannot make the membrane selection based on one

characteristic only; at least we have to define on what parameter the selection will be made. In a previous work we have shown, in one hand, the cationic/anionic membrane pair characterization by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) for nitrate electro dialysis and in the other hand, its ranking in terms of ion transport facility not only as single cationic and anionic membrane characterization but the membrane pair as a unit (López-García, López-García; 2005, 2009). In this work we have tested 9 membrane pairs for sodium nitrate splitting. Each membrane pair was evaluated by limiting current, nitrate removal rate, nitrate, sodium and proton leakage, Current efficiency (CE) and Specific Power Consumption (SPC) to stress the importance of single or membrane pair selection parameter.

Experimental Electrodialysis

The DS-0 system from Asahi Glass was used for the ED experiments (fig. 1). The system consisted of three separated circuits for the acid, salt feed and caustic solutions, each with a volume of 3 L. A salt splitting arrangement was used. Solutions recirculate by separate Iwaki magnetic-centrifugal pumps model MD-30-RN having a maximum capacity of 1800 Lh⁻¹. Two flow rate and one gap were used i.e. 25 and 50 Lh⁻¹ and 1.5 mm. The stack was connected to a Sorensen power supply model DCS 60-50 providing direct current through a platinum plated titanium anode and a stainless steel cathode whose operating area as well as that of membranes, was of 172 cm². ED experiments were carried out at 70% of limiting current to avoid undesirable reactions.

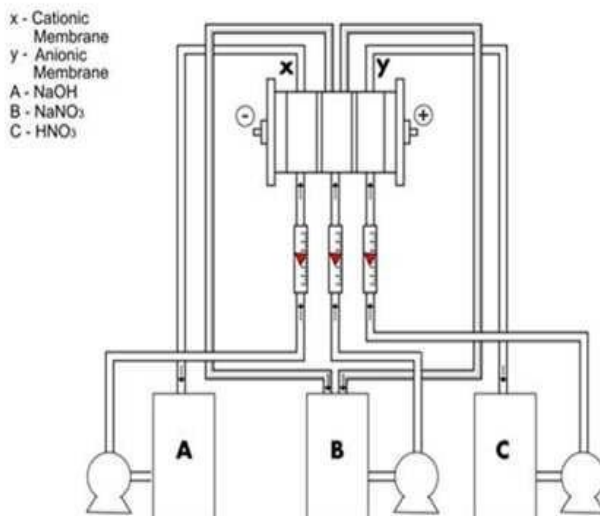


Figure 1. Electrodialysis setup for experimental membrane characterization

Chemicals

All experiments were carried out with HNO₃ 0.01 molL⁻¹ solutions for anodic compartment and NaOH 0.01 molL⁻¹ for cathodic compartment while NaNO₃ 0.5 molL⁻¹ was used for salt feed compartment. Technical grade NaNO₃ was purchased from Insumos Químicos Azteca; HNO₃ and NaOH were of reagent grade, obtained from J.T. Beaker.

All reagents were used without further purification. Solutions were prepared with deionized water. The pH of the 0.5 molL⁻¹ NaNO₃ solution was in the range of 8 to 9, which was attributed to impurities in the industrial-grade reagent. Titration of this solution showed that these impurities accounted for an alkalinity no greater than 3·10⁻⁴ molL⁻¹ OH⁻. All ED experiments were conducted under the above conditions unless specified in the text.

Ion Exchange Membranes

Commercial ion-exchange membranes CMV, AMV and AAV were purchased from Asahi Glass, CMS and ACM were obtained from Tokuyama, and membranes 3470 and 3475 were provided by Sybron. All the membranes were immersed in NaNO_3 0.5 molL^{-1} for 24 h. before ED experiment. The complete list of membrane pairs tested is shown in table 1, table 2 give the membrane properties.

Limiting Current

Limiting current (LC) experiments were carried out on the ED stack under operational conditions. LC was obtained from R vs. $1/I$ plots as described by Sorensen. Values are the mean of at least 3 experiments.

Table 1.
Membrane pairs tested and manufacturers

COMBINATIONS	MANUFACTURER
3470-3475	Sybron-Sybron
3470-AMV	Sybron-Asahi
3470-ACM	Sybron-Tokuyama
CMV-3475	Asahi-Sybron
CMV-AMV	Asahi-Asahi
CMV-ACM	Asahi-Tokuyama
CMS-3475	Tokuyama-Sybron
CMS-AMV	Tokuyama-Asahi
CMS-ACM	Tokuyama-Tokuyama

Table 2.

General properties of membranes

Membrane	Exchange group	Transport Number	Mechanical Resistance (kg/cm ²)	Use and observations
CMS (Tokuyama)	Cation	0.99<	3-4	Permeable especially to monovalent cations
CMV (Asahi)	Cation	0.98<	3-5	Use general
3470 (Sybron)	Cation	>0.93	13.26	Periodic production of acid Desalination of water of sea Desalination of brackish water Recovery of metals
ACM (Tokuyama)	Anion	0.98<	2-3	Low permeability of the proton
AMV (Asahi)	Anion	0.98<	3-5	Use general
AAV (Asahi)	Anion	0.98<	1.5-2	Concentration of acid It prevents the diffusion of the proton
3475 (Sybron)	Anion	>0.99	13.26	Periodic production of acid Desalination of water of sea Desalination of brackish water Recovery of metals

II. Analytical Methods

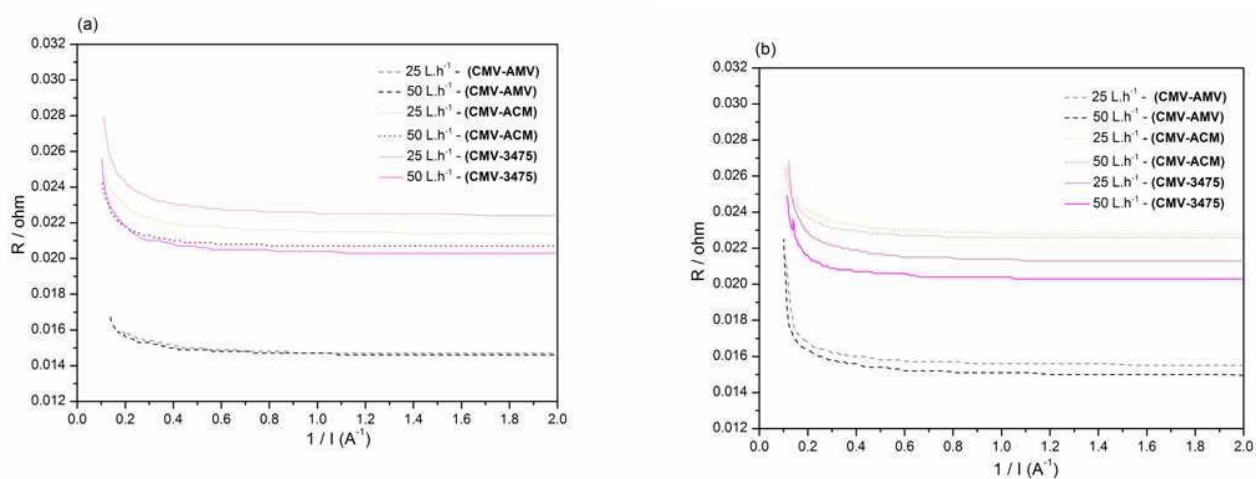
Samples from ED experiments were taken periodically and analyzed for: Na⁺ by Inductive Coupled Plasma spectroscopy (ICP-OES) Perkin Elmer model 3300DV, NO⁻ in a HACH spectroscope model DR/2010, and H⁺ and OH⁻ by acid-base titration.

III. Results and Discussion Limiting Current

Limiting current was evaluated from R vs. 1/I plots as described elsewhere (Sorensen, 1999). Figure 2 shows the behavior of the different membrane pairs. In

all of the cases it is observed an inflexion point where graphically one can obtain the limiting current value. Physically the inflexion point means that there is a steady state so the number of nitrate ions that enter the membrane are equal to the number of nitrate ions that enter to the diffusion zone.

Table 3 shows the membrane pair ranked by limiting current and table 4 shows the membrane pair ranked by voltage applied at limiting current at different



flow values.

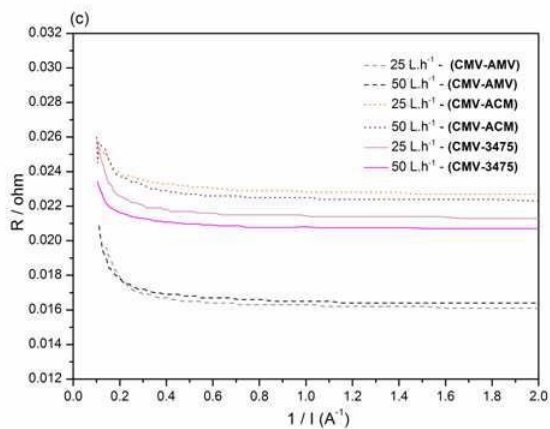


Figure 2. R vs. $1/I$ plots to calculate the limiting current. a) 3470 series, b) CMV series, c). CMS series.

Table 3.

Membrane pair ranking by Limiting current

MEMBRANE PAIR	Limiting Current	Limiting Current
	@ 25 Lh ⁻¹ (A)	@ 50 Lh ⁻¹ (A)
CMV-AMV	5.5	6.0
CMV-3475	4.8	5.1
CMS-3475	4.0	5.1
3470-ACM	3.7	5.0
CMV-ACM	3.6	5.0
CMS-ACM	3.5	5.0
CMS-AMV	3.4	5.0
3470-AMV	3.4	4.9
3470-3475	2.2	3.0

Table 4.

Membrane pair ranking by Voltage at limiting current

25 Lh ⁻¹		50 Lh ⁻¹	
MEMBRANE PAIR	Voltage @ limiting current (V)	MEMBRANE PAIR	Voltage @ limiting current (V)
CMS-AMV	4.9	CMS-AMV	5.0
CMV-ACM	5.3	CMV-ACM	5.6
3470-AMV	5.6	CMV-AMV	5.7
CMS-3475	5.6	CMS-3475	5.8
CMV-AMV	5.7	3470-AMV	6.1
CMS-ACM	5.8	CMS-ACM	6.1
3470-ACM	6.0	3470-ACM	6.3
3470-3475	6.3	3470-3475	6.7
CMV-3475	7.0	CMV-3475	7.0

Tables 3 and 4 point out important differences. One can see that one membrane pair can show the highest limiting current and the lower voltage or viceversa. Indeed one membrane pair can work better than other at a fixed current or voltage and have a worst performance at another voltage or current as can be seen in figure 3a, 3b and 3c, where it is shown that curves overlap and change position as voltage increases.

Electrodialytic Nitrate Removal

The ED study was performed for every membrane pair to compare their performance in terms of nitrate ions removal. Figures 4a and 4b show an increase of nitrate, as well as the proton ions, in the anodic compartment. Figures 5a and 5b show that of sodium and hydroxyl ions in the cathodic compartment, as expected. Figure 6a and 6b show the nitrate and sodium concentration decrease in the feed compartment. One can note a linear increase in nitrate, proton, sodium and hydroxyl ions in their respective compartment. This expected behavior is observed for all the membrane pairs tested. The nitrate increase in anodic compartment is equal to that of sodium in cathodic compartment, the differences being attributed to the analysis accuracy and leakage from one to another compartment. Concentration increase or decrease have the same magnitude and just a little higher at 50 Lh^{-1} than at 25 Lh^{-1} . CMV-AMV arte the best performing membrane pair, while the worst is 3470-4375. All others membrane pairs fall in between and their performance are almost the same.

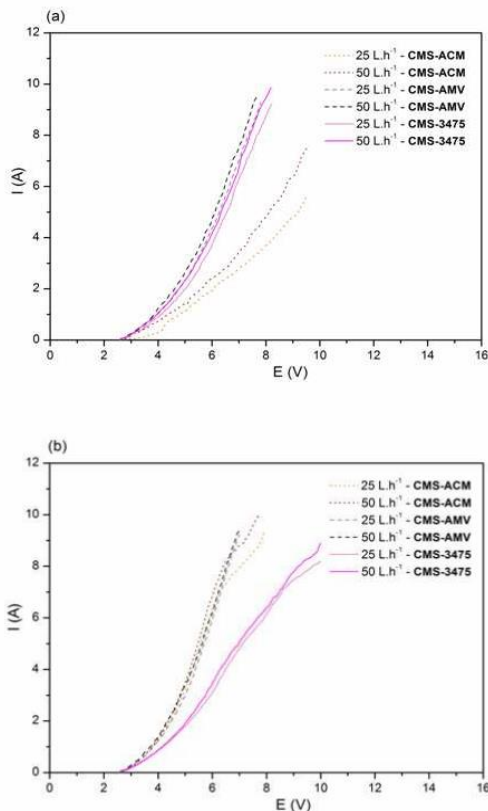
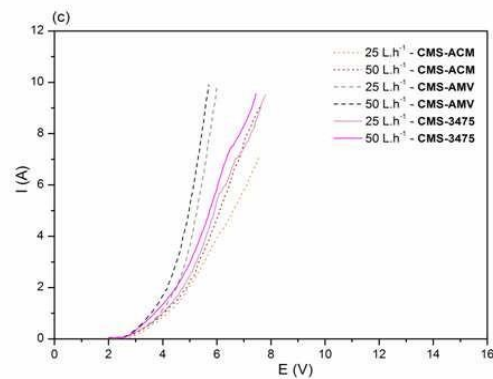


Figure 3. Polarization curves for a). 3470 series, b). CMV series, c). CMS series



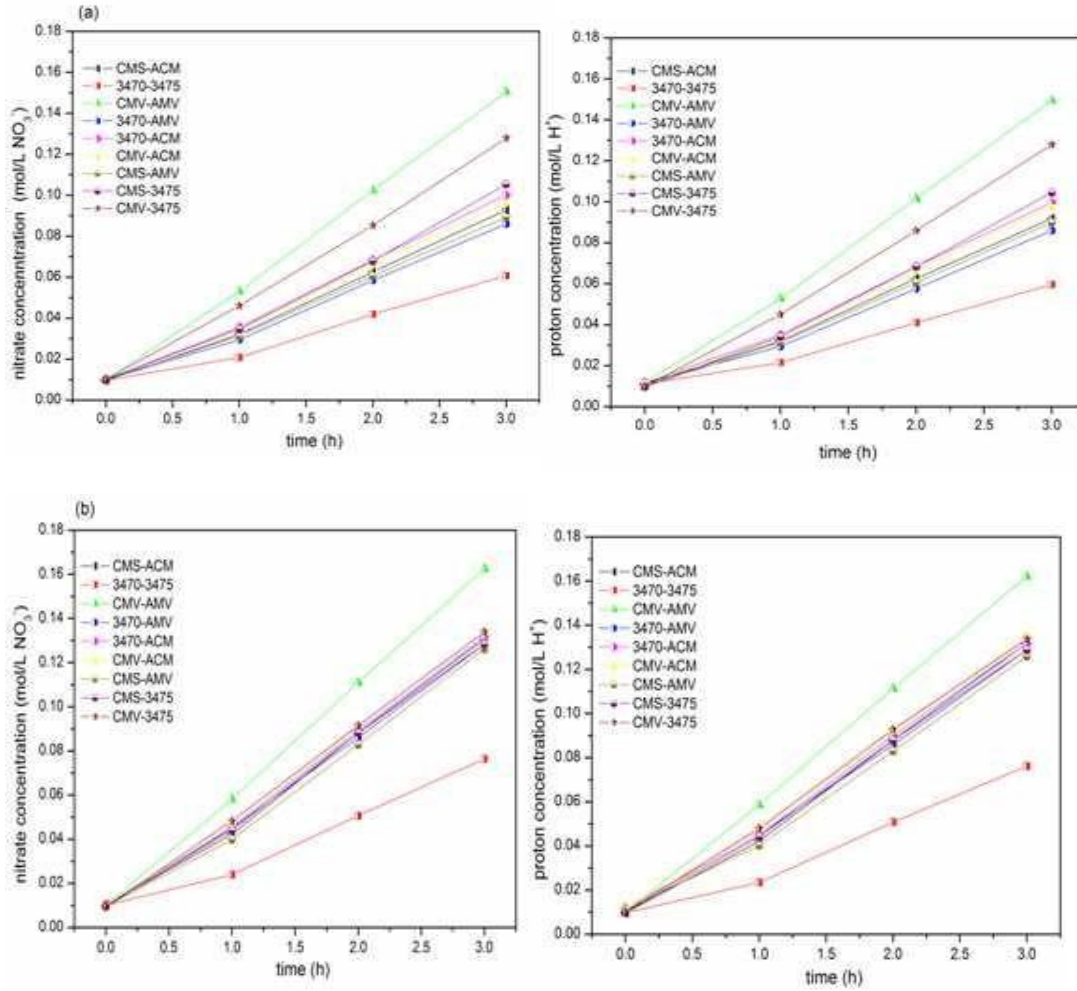


Figure 4. Nitrate and proton concentration in anodic compartment at two different flow rates. a) 25 Lh⁻¹, b) 50 Lh⁻¹

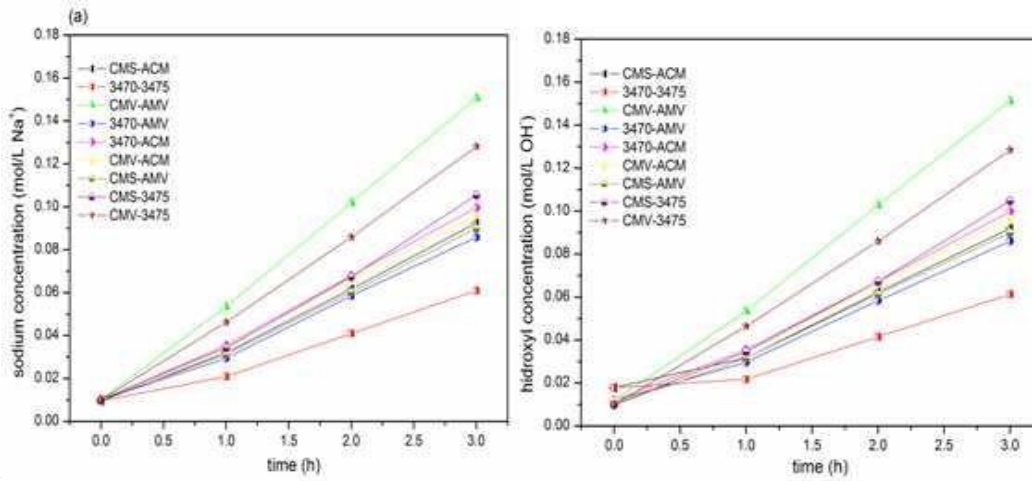


Figure 5. Sodium and Hydroxyl concentration in cathodic compartment at two different flow rates. a) 25 Lh⁻¹, b) 50 Lh⁻¹

Nitrate and Sodium Ions Leakage

For all the membrane pairs tested, ion leakage has been studied by monitoring the sodium concentration in anodic compartment and nitrate ion in cathodic compartment. In figure 7 one can see sodium leakage to the anodic compartment and nitrate leakage to the cathodic compartment, in spite of stack and membrane polarity. It is to note too that leakage depends on the associated membranes. Flow conditions seem to have more important influence on nitrate leakage than in sodium leakage. CMV-AMV and CMS- AMV are the best membrane pairs regarding sodium leakage to the anodic compartment at 25 and 50 LHR-1; as leakage stay at very low values. In the other hand CMS-AMV and CMV-ACM are the best regarding nitrate leakage to the cathodic compartment at both flow values. One interesting thing to note is that nitrate leakage is at least two orders of magnitude higher than sodium leakage, leading to an apparent imbalance in the global electroneutrality. This behavior will be discussed later.

Feed Compartment Acidification

Proton back migration has been observed in all cases under all operation conditions. Feed compartment pH change from ca. 9 to ca.2.5. As for nitrate and sodium leakage, it seems that proton back migration depends on the associated membrane and on the flow rate. Figure 8 shows the proton and hydroxyl ions behavior in the feeding compartment. Balance between protons and hydroxyl ions is not clear, because entering protons level to feeding compartment is of about two magnitude order higher than neutralized or entering hydroxyl ions, leading to an apparent imbalance in the global electroneutrality. Ranking by proton leakage does not agree with the ranking by limiting current or Current efficiency (see figure 3 and tables 3 and 4). This behavior is probably due to the differences between the chemical nature of proton and the other charged species.

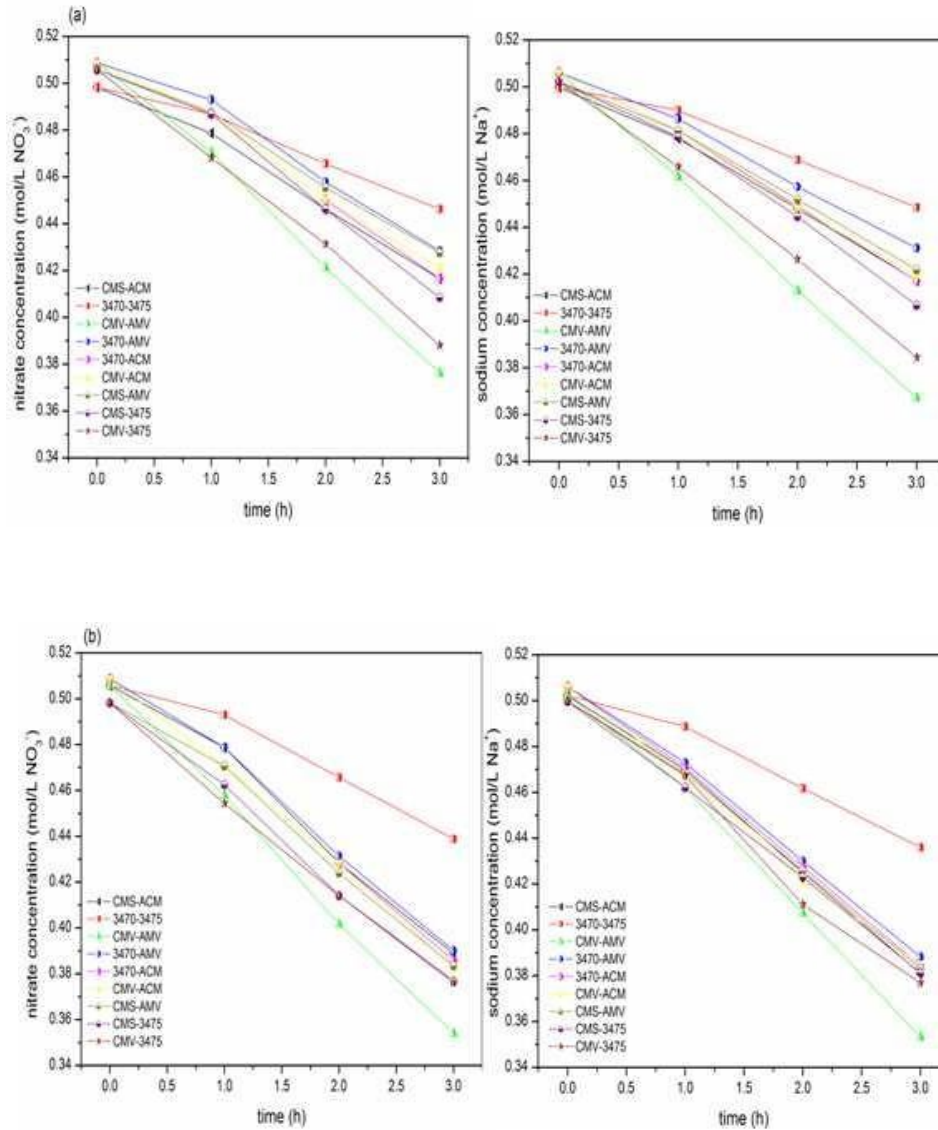


Figure 6. Nitrate and Sodium ions concentration in feed compartment. a) 25 LHR⁻¹, b) 50 LHR⁻¹

Talking about leakage we can see in figures 7a, 7b, 8a and 8b, that, sodium ion goes to the anodic compartment and hydroxyl ions comes to the central compartment and their levels are of the same magnitude. In the same way, as can be seen in the same figures, nitrate ion goes to the cathodic compartment and proton comes to the central compartment and their leakage level is of the same magnitude, thus keeping the global electroneutrality. Nevertheless, since proton back migration (proton leakage) is higher than hydroxyl ion, the known

consequence is the acidification of the central compartment. The reason for this behavior remains unknown for us. It is probably due to ions facility to move through membrane and/or interactions between ions and functional groups in the membrane, etc. Work is under conduction to elucidate this behavior.

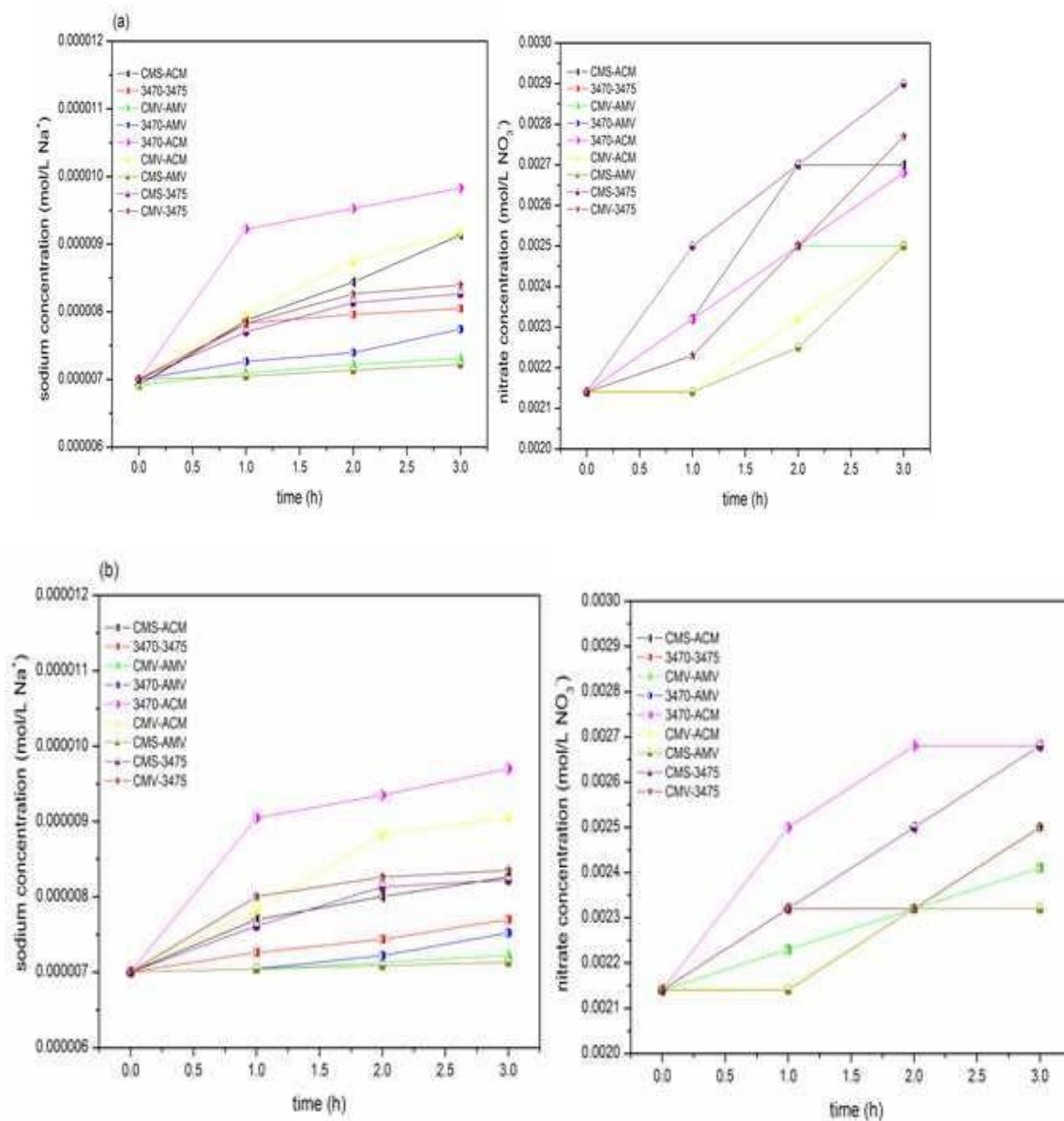


Figure 7. Ions leakage: Sodium in anodic compartment and Nitrate in cathodic compartment. a) 25 Lh⁻¹, b) 50 Lh⁻¹

Current Efficiency

We have tested all the membrane pairs regarding current efficiency (CE). The CE is a measure of the system's ability to use the current advisedly. The CE for production of a component C during a time period t is the ratio between the moles of C produced during t and the theoretical moles corresponding to the quantity of charge involved during t. Figure 9 show the CE for every membrane pair at 25 and 50 25 Lh^{-1} . One can see that CE depends on the associated membrane and that varies with flow rate. Indeed, both ranking do not agree with that of limiting current ions leakage, clearly manifesting the multifactorial process nature.

Specific Power Consumption

The effect of applied voltage and membrane pairs on specific power

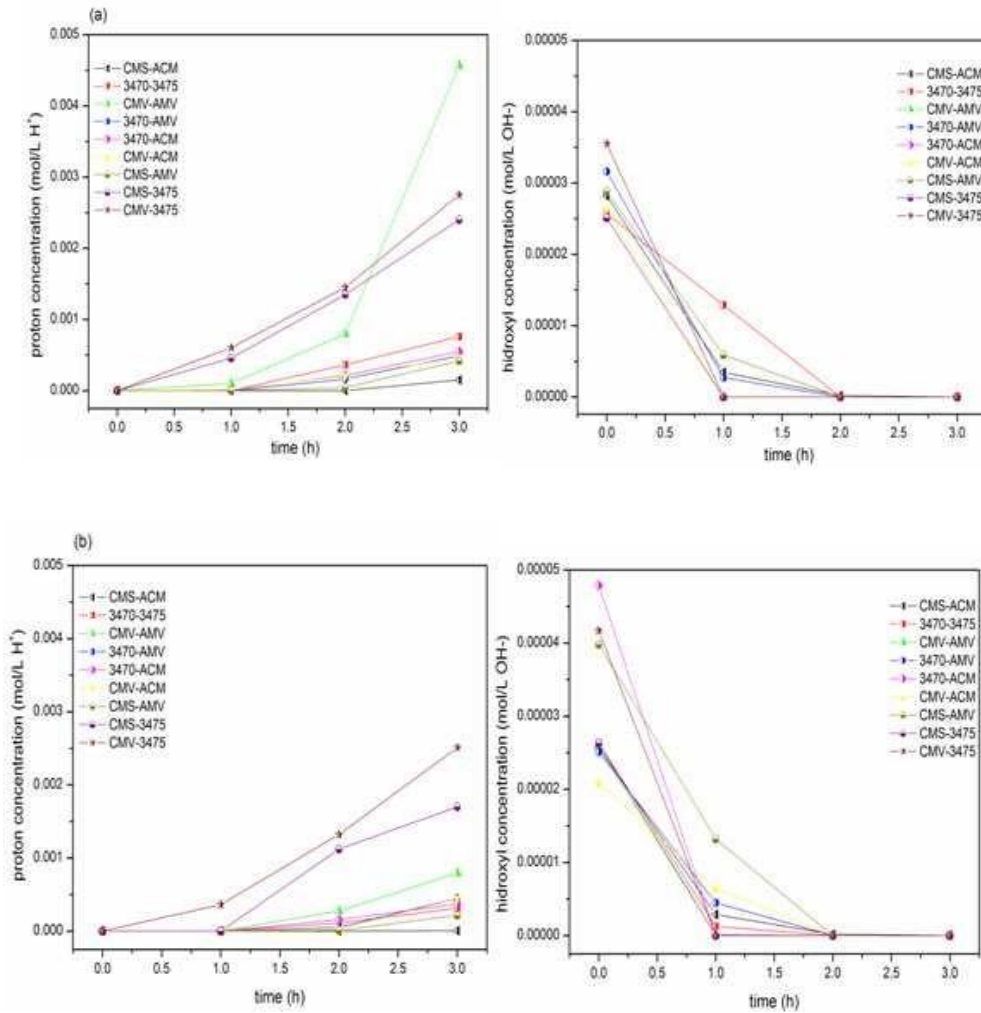


Figure 8. Ions leakage: Proton in feed compartment and hydroxyl in feeding compartment. a) 25 Lh^{-1} , b) 50 Lh^{-1} consumption (SPC) was calculated using Eq. 2

$$SPC = \frac{\int_0^2 E I dt}{V_F}$$

Where E is the voltage applied, t is time, I is current and VF is the volume of feed compartment. The Calculated SPC values for nitrate removal are shown in figure 10. It was found that the more efficient the membrane pair, the more power consuming. Once again, this behavior is probably due to multifactorial nature of process where the main factors are: Electrical resistance of membrane pair, transport number of membrane pair solution physical properties, membrane-ions interaction/modification, nitrate, sodium and proton leakage, etc.

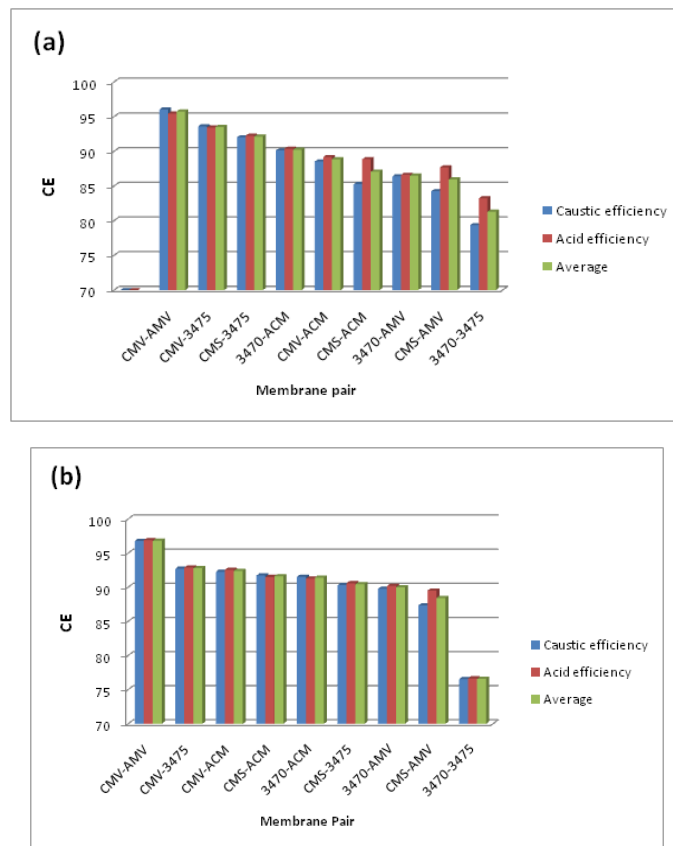


Fig. 9. Current efficiency ranking for the membrane pairs tested a) 25 Lh⁻¹, b) 50 Lh⁻¹

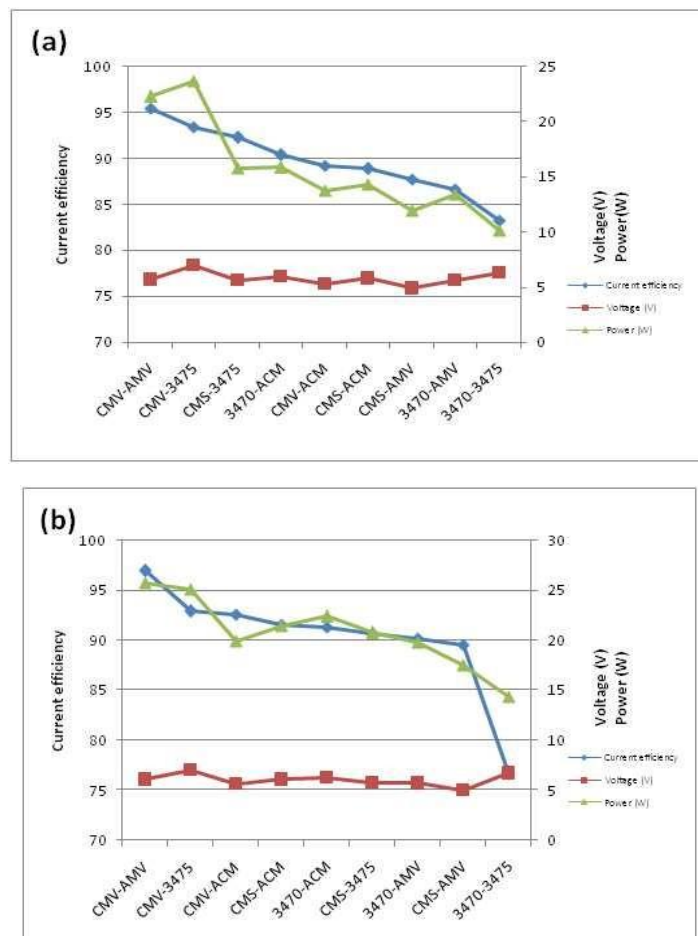


Figure 10. Efficiency, Voltage applied and SPC for all the membrane pairs tested, a) 25 Lh⁻¹, b) 50 Lh⁻¹

IV. Conclusions

Results show that one cannot select a membrane or a membrane pair by only limiting current characterization. i.e. it is necessary to determine several parameters of the process by characterizing the whole membrane pair and to decide the parameter of interest, i.e. denitrification speed (limiting current), ions leakage, proton back migration, current efficiency or specific power consumption. As we have shown that the process studied in this case, the salt splitting of sodium

nitrate for denitrification and reclaiming soda and nitric acid, is multifactorial dependent. Ranking is not the same for limiting current, denitrification rate, ions leakage, current efficiency and specific power consumption.

V. References

- Afkhami, A., Madrakian, T., & Karimi, Z. (2007). *The effect of acid treatment of carbon cloth on the adsorption of nitrite and nitrate ions*, J. Hazard. Mater. 144 427–431.
- Chiao, Y.C., Chlanda, F.P., Mani, K.N. (1991). *Bipolar membranes for purification of acids and bases*, J. Membr. Sci. 61 239.
- Choi, S., & Yun, Z. (2001). *The effect of co-existing ions and surface characteristics of nanomembranes on the removal of nitrate and fluoride*, Desalination, 133 53–64.
- Clifford, D., & Liu, X. (1993). *Ion exchange for nitrate removal*, J. AWWA 85 135 – 143.
- Elmidaoui, A., Elhannouni, F., MenkouchiSahli, M.A., Chay, L., Elabbassi, H., Hafsi, M. & Largeteau, D. (2001). *Pollution of nitrate in Moroccan ground water: removal by electrodialysis*. Desalination 136 325–332.
- Gain, E., Laborie, S., Viers, Ph., Rakib, M., Durand, G., & Hartmann, D. (2002). *Ammonium nitrate wastewater treatment by coupled membrane electrolysis and electrodialysis*, J. Appl. Electrochem. 32 969.
- Gain, E., Laborie, S., Viers, Ph., Rakib, M., Hartmann, D., & Durand, G. (2002). *Ammonium nitrate wastewater treatment by an electromembrane process*, Desalination 149 337.
- Gineste, J.L., Pourcelly, G., Lorrain, Y., Persin, F., & Gavach, C. (1996). *Analysis of factors limiting the use of bipolar membranes: a simplified model to determine trends*, J. Membr. Sci. 112 199.
- Hell, F., Lahnsteiner, J., Frischherz, H., & Baumgartner, G. (1998). *Experience with full-scale electrodialysis for nitrate and hardness removal*, Desalination 117 173–180.

- Jae-Hee Ahn, Kwang-Ho Choo, & Hak-Soon Park. (2008). *Reverse osmosis membrane treatment of acidic etchant wastewater: Effect of neutralization and polyelectrolyte coating on nitrate removal*, *J. Memb Sc* 310 296–302
- Kima, Y.-H., Hwangb, E.-D., Shinc, W.S. Choic, J.-H., Had, T.W., & Choic, S.J. (2007). *Treatments of stainless steel wastewater containing a high concentration of nitrate using reverse osmosis and nanomembranes* *Desalination* 202 286–292.
- López, G. U. (2005). *Thesis of master degree in Electrochemistry, Nitrate removal by electrodialysis*, CIDETEQ, México.
- López, G. U., Antaño, R., Orozco, G., Chapman, T., & Castaneda, F. (2009). *Characterization of electrodialysis membranes by electrochemical impedance spectroscopy at low polarization and by Raman spectroscopy*, *Sep. Purif. Technol* 68 375–381.
- Mani, K.N. (1991). *Electrodialysis water splitting technology*, *J. Membr. Sci.* 58 117.
- Mani, K.N., Chlanda, F.P., & Byszewski, C.H. (1988). *Aquatech membrane technology for recovery of acid/base value for salt streams*, *Desalination* 68 149.
- Martin, C.J., Kartinen E.O., & Condon, J. (1995). *Examination of processes for multiple contaminant removal from groundwater*, *Desalination* 102 35–45.
- Martin, C.J., Kartinen, E.O., & Condon, J. (1995). *Examination of processes for multiple contaminant removal from groundwater*, *Desalination*, 102 35–45.
- Molinari, R., Argurio, P., & Romeo, L. (2001). *Studies on interactions between membranes (RO and NF) and pollutants (SiO₂, NO₃⁻, Mn²⁺ and humic acid) in water*, *Desalination*, 138 271–281.
- Mourad, A., & Hacène, K. (2007). *A modified anion-exchange membrane applied to purification of effluent containing different anions. Pre-treatment before desalination*, *Desalination* 206 (2007) 205–209.
- Rocca, C.D., Belgiorno, V., & Meric, S. (2007). *Overview of in-situ applicable nitrate removal processes*, *Desalination* 204 46–62.
- Sawa, T., Hirose, Y., Ishii, Y., Takatsudo, A., Wakasugi, K., H., & Hayashi, H. (1995). *Development of electrochemical denitrification from waste water containing*

ammonium nitrate, radioactive waste management and environmental remediation, ASME 1089.

Schoeman, J.J., Steyn, A., & Scurr, P.J. (1996). *Treatment using reverse osmosis of an effluent from stainless steel manufacture*, *Water Res.*, 30 (9) 1979–1984.

Soares, M.I.M. (2000). *Biological denitrification of ground water*, *Air Soil Pollut.* 123 183–193.

Sorensen, T. S. (1999). *Interfacial Electrodynamics of membranes and Polymer Films, in Surface Chemistry and Electrochemistry of Membranes*, Vol. 79. New York.

Su, C., & Puls, R.W. (2004). *Nitrate reduction by zerovalent iron: effects of formate, oxalate, citrate, chloride, sulfate, borate, and phosphate*, *Environ. Sci. Technol.* 38 2715 – 2720.

Van der Bruggen, B., Koninckx, A., & Vandecasteele, C. (2004). *Separation of monovalent and divalent ions from aqueous solution by electrodialysis and nanofiltration*, *Water Research* 38 1347–1353.

Wang, H., & Qu, J. (2003). *Combined bioelectrochemical and sulfur autotrophic denitrification for drinking water treatment*, *Water Res.* 37 3767–3775.

CAPÍTULO 7.

SUMINISTRO DE AGUA SALOBRE A PLANTAS DESALINIZADORAS MEDIANTE BARRERAS DE POZOS QUE DETENGAN LA INTRUSIÓN SALINA EN ACUÍFEROS COSTEROS.

Armando Gabriel Canales Elorduy

Rodrigo González Enríquez

Luis Alonso Islas Escalante

Instituto Tecnológico de Sonora.

Tel: +52644 4109000 Ext 2114

e-mail: armando.canales@itson.edu.mx; rodrigo.gonzalez@itson.edu.mx; luis.islas@itson.edu.mx

SUMARIO: I. *Introducción*, II. *Descripción de la planta Desalinizadora*,
III. *Construcción de pozos de observación*,
IV. *Conclusiones*, V. *Referencias*.

Resumen

La construcción y operación de una planta desalinizadora puede aportar volúmenes de agua en cantidad y calidad aceptables para consumo humano y uso industrial aprovechando el agua salobre contenida en los acuíferos afectados por la intrusión salina. El diseño y operación de una barrera de pozos que suministra agua a una planta desalinizadora puede cumplir también el objetivo de proteger los acuíferos mediante la detención del avance de la intrusión salina. Se presenta un caso que proporciona agua potable a una población de 177,000 habitantes en el Sur de California a un costo equivalente a \$11.00 pesos mexicanos por metro cúbico. La perforación de pozos de observación con al menos dos piezómetros independientes son de gran utilidad para los estudios de hidrología subterránea como por ejemplo al proporcionar datos útiles para diseño, construcción y operación de una barrera de pozos de bombeo que suministra agua salobre a una planta desalinizadora. Desde su construcción y una vez terminados los pozos de monitoreo, permiten obtener registros litológicos y geofísicos que proporcionan información relacionada con la cantidad y calidad del agua en diferentes estratos y que es necesaria para la calibración de los modelos. Dado su alto costo conviene diseñar y mantener con todo cuidado un sistema de monitoreo que incluya pozos de observación con piezómetros independientes. Aun incluyendo el costo del sistema de monitoreo, de la elaboración de modelos para conocer el comportamiento de la interfase agua dulce-agua salada y la construcción, operación y mantenimiento de una barrera de pozos de bombeo, puede considerarse que el suministro de agua salobre de acuíferos a una planta

desalinizadora es una alternativa que es susceptible de utilizar ante la desalinización con agua directa de mar.

Palabras clave: *desalinización del agua, barrera contra la intrusión salina, pozos de observación, registros geofísicos, modelos de simulación.*

I. Introducción

Importantes acuíferos costeros del noroeste de México, están sometidos a fuertes extracciones de agua del subsuelo, por lo que se encuentran severamente afectados por el fenómeno de intrusión salina del mar.

Esto permite que existan volúmenes de agua salobre producto de la mezcla agua dulce – agua de mar almacenada en las reservas próximas a la costa.

La alternativa de aprovechar el agua salobre en acuíferos como el del Valle de Guaymas, entre otras opciones, conduce a proponer el diseño de una planta desalinizadora, para la cual se requieren una serie de estudios, tanto de la fuente que proveería el agua como de la planta en sí misma.

En los estudios de fuentes de abastecimiento como el caso de los acuíferos, la perforación de pozos, estratégicamente realizada, permite obtener información directa que es de capital importancia para conocer el comportamiento y las respuestas frente a distintas alternativas de explotación. Indudablemente que la Geofísica constituye una herramienta de exploración indirecta que por su menor costo permite cubrir áreas y profundidades mayores, sin embargo para su calibración se requiere de la exploración directa en pozos y afloramientos geológicos.

En la propuesta aceptada por el programa UC-MEXUS-CONACYT, se refieren los métodos de control contra la intrusión salina en acuíferos costeros para los casos de los valles de Guaymas y Boca Abierta en el noroeste de México, con el objetivo general de conocer el comportamiento de los niveles y calidad del agua en

los acuíferos de los valles mencionados con barreras de pozos de bombeo e infiltración respectivamente usando modelos de densidad variable.

Como objetivos específicos se plantearon, estimar los volúmenes de agua salobre en la zona de interfase y su evolución frente a un proceso de extracción en el Valle de Guaymas para su desalinización y conservación del acuífero y analizar la factibilidad de infiltración de aguas residuales tratadas en Boca Abierta para la conservación del acuífero.

Lo anterior se suplementa con un conjunto de pozos de monitoreo que serán necesarios y en última instancia dan los elementos para el diseño, ejecución y operación de la barrera.

Los pozos de monitoreo caracterizarían mejor la distribución vertical de la salinidad en el acuífero multi-capas (con registros geofísicos EM, gamma y muestreo isotópico de elementos-traza) y también facilitarían algunas estimaciones de permeabilidad en estratos con pruebas "Slug". Obtener además algunos registros de flujos de entrada en los diferentes estratos de pozos típicos de bombeo existentes ayudará en la instalación de sitios de monitoreo con pozos múltiples cuyas secciones ranuradas permitan observar las zonas más activas y transmisivas afectadas por el bombeo o por la intrusión salina.

En los acuíferos de los valles de Guaymas y Boca Abierta se han simulado barreras con pozos de bombeo e inyección respectivamente con la finalidad de detener el avance de la intrusión salina. Es así como utilizando el paquete de modelación MODFLOW se obtuvo el comportamiento de los niveles del agua en el acuífero de Boca Abierta para un período de 50 años (Quiñónez, 2005) y para el acuífero del Valle de Guaymas se ha simulado la intrusión salina (Borgo *et al.*, 2001) y se tiene ya calibrado el modelo de densidad variable SEAWAT

(Manjarrez, 2011) que será de gran utilidad para _simular el comportamiento de la barrera de pozos de bombeo.

Objetivo

Presentar un caso de suministro de agua salobre a una planta desalinizadora y la construcción de un pozo de observación, ejemplos que dan pie a la construcción de barreras de pozos estratégicamente diseñadas, de modo que constituyan una defensa efectiva contra el avance de la intrusión salina en los acuíferos costeros (Pool y Carrera, 2010).

Fundamento

Entre los métodos de control de la intrusión salina mediante barreras o baterías de pozos, los de inyección o absorción, cuando por supuesto hay agua disponible para ese propósito, han sido más ampliamente utilizados en las costas de Canadá, Estados Unidos de América y México (Barlow y Reichard, 2010). En cambio, las barreras de extracción se conocen menos y por lo tanto requieren de mayor análisis.

Es así como Pool y Carrera, 2010, proponen el uso de barrera doble de bombeo y después de un análisis de simulación numérica tridimensional del comportamiento del sistema pozo agua salada – pozo agua dulce demuestran la mayor efectividad de este tipo de barrera, bajo ciertas condiciones de distancia, ubicación vertical e intensidad variable de extracción, recomendando mayor investigación para este esquema.

II. Descripción de la Planta Desalinizadora

Las experiencias que en el campo de desalinización y perforación de pozos de exploración se han tenido en una zona semi-árida de características hidrogeológicas similares al Estado de Sonora y que por lo tanto aportan antecedentes aplicables en algunos de sus aspectos a la situación que prevalece en acuíferos de las planicies costeras del noroeste de México, se presentan en el ejemplo que se describe a continuación.

En los párrafos siguientes se resumen las características de una planta desalinizadora que se encuentra en operación en San Diego, CA; así como algunas características de un pozo en perforación con fines de observación.

Planta Desalinizadora Richard A. Reynolds, en Chula Vista, CA, Estados Unidos de Norteamérica (EUA)

Esta planta pertenece y es operada por la Autoridad del Agua Dulce (Sweetwater Authority) dependiente del Distrito de Riego South Bay and Nacional City.

La planta suministra agua para consumo humano hasta en un 70% del agua de fuentes de abastecimiento local a los 177,000 habitantes de las poblaciones de Chula Vista, Nacional City y Bonita en la región de San Diego, CA, EUA.

La planta se abastece con el agua de pozos contaminados por salinidad, del orden de 2000 mg/L STD y emplea el sistema de ósmosis inversa (O/I) en su proceso para eliminar sales disueltas además de filtros que retienen partículas microscópicas (bacterias y otros contaminantes) que se encuentran en el agua subterránea de depósitos aluviales. El agua del proceso O/I es tratada para evitar corrosión y se le desinfecta con cloro y amonía. Consta de dos etapas. La primera

se concluyó en 1999 con una producción de 15,000 m³/ d y con preparaciones para duplicar ese volumen en una segunda etapa.

El agua se entrega a un costo equivalente de \$ 11.00 pesos mexicanos por cada metro cúbico y el efluente de salmuera desechada se conduce al mar con una concentración de 9 000 mg/L de STD.

Dado que los estudios previos y el seguimiento para la localización, el diseño, la construcción y la operación de una planta desalinizadora requieren de un conjunto de datos, entre los que se encuentran los que se refieren al comportamiento de los niveles del agua y de la concentración salina en la zona de interfase del fenómeno de intrusión salina, es indispensable disponer de un sistema de pozos de observación para este objeto. Es por ello que en la siguiente sección de esta descripción se hace referencia a la construcción y obtención de datos en pozos de monitoreo.

III. Construcción de Pozos de Observación

Es inobjetable la construcción y operación de un sistema de monitoreo (u observación) que proporcione directamente los datos que todo estudio de hidrología subterránea requiere, desde sus etapas de reconocimiento hasta la modelación, aún a sabiendas del elevado costo por la perforación de pozos y la recolección sistemática y continua de datos. Los modelos de flujo y transporte de contaminantes, especialmente los de densidad variable, requieren para su calibración los datos que aporta el sistema de monitoreo.

Para elaborar las secciones hidrogeológicas con condiciones de frontera que requieren perfiles litológicos, estratigráficos y evaluación preliminar de características y parámetros relativos a la permeabilidad, capacidad de

almacenamiento de las rocas y calidad del agua del medio poroso, se hacen necesarios dichos pozos de observación.

Especialmente en las zonas de estudio en las que se planea, construye y opera una barrera de pozos para abastecer una planta desalinizadora y simultáneamente ejercer un control sobre el avance de la intrusión salina en un acuífero costero, un sistema de monitoreo adecuado para cada caso concreto, aporta información clave para la efectividad de dichas instalaciones.

Es así como se hace indispensable el monitoreo donde se perfora y opera una batería de pozos salobres que requieren condiciones de salinidad estables para sostener los costos de desalinización del agua en un rango aceptable durante la vida útil de las instalaciones.

Un pozo con fines de exploración se planea cuidadosamente para definir desde su localización, características constructivas, registros que se recabarán durante el proceso de perforación y posteriormente para contar con la información que los estudios requerirán.

Las figuras 1, 2 y 3 ilustran el corte litológico, el croquis de terminación y los demás registros geofísicos, en un pozo perforado en el Noroeste de México, con la colaboración de la Comisión Nacional del Agua y el Instituto Tecnológico de Sonora, al cual se le instalaron dos piezómetros en la unidad hidrogeológica somera, separada por un estrato arcilloso de la unidad inferior.

Un pozo de observación como el que se muestra en la Figura 2 incluye dos “piezómetros” o pequeños pozos con ademe ranurado en intervalos específicos e independientes, ya que el perfil estratigráfico permite que la separación que se hace al interior para aislar cada piezómetro resulte efectivamente en aportes independientes de los estratos que se captan. Fuera del país este tipo de pozos se construyen de mayor diámetro y hasta con cuatro piezómetros.

En los pozos de los sistemas de monitoreo de California, EUA, se instalan equipos de registro continuo de la variación de los niveles del agua, con transmisión de datos por radio por ejemplo. Periódicamente se corren registros geofísicos que muestran la evolución de la calidad del agua.

Antes de ademar un pozo exploratorio se pueden correr los registros de variación de diámetro de perforación, rayos gamma, potencial espontáneo, resistividad normal larga y corta, temperatura y conductividad electromagnética.

Será de gran utilidad contar con estos pozos en zonas de estudio en las que, con fines de tomar decisiones de importancia para el aprovechamiento del acuífero se puedan aplicar modelos que analizan distintas condiciones de explotación.

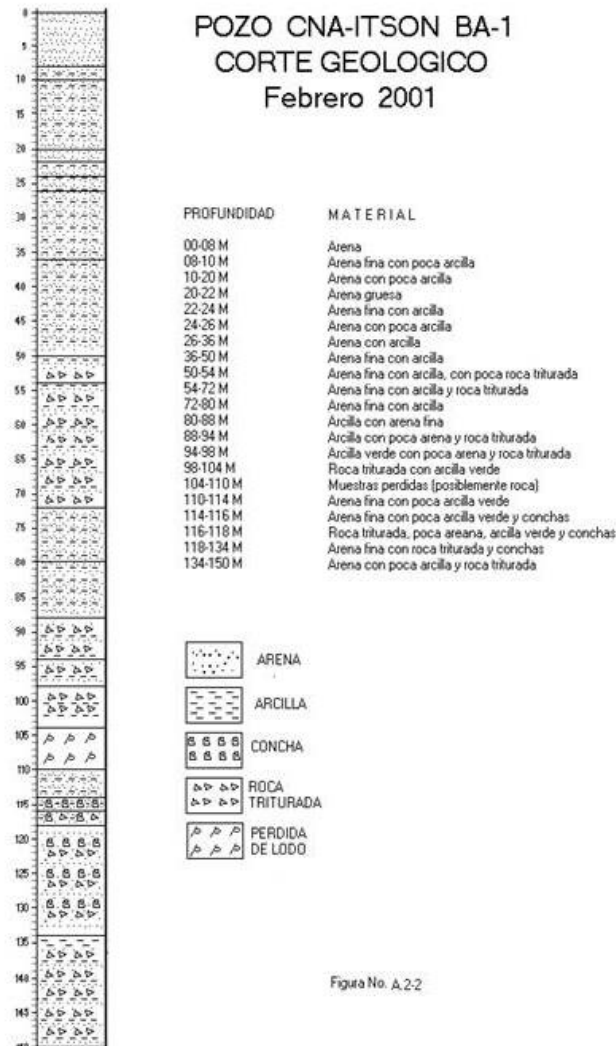


Figura No. A.2.2

Figura 1. Corte litológico. Fuente: (CONAGUA, 2000)

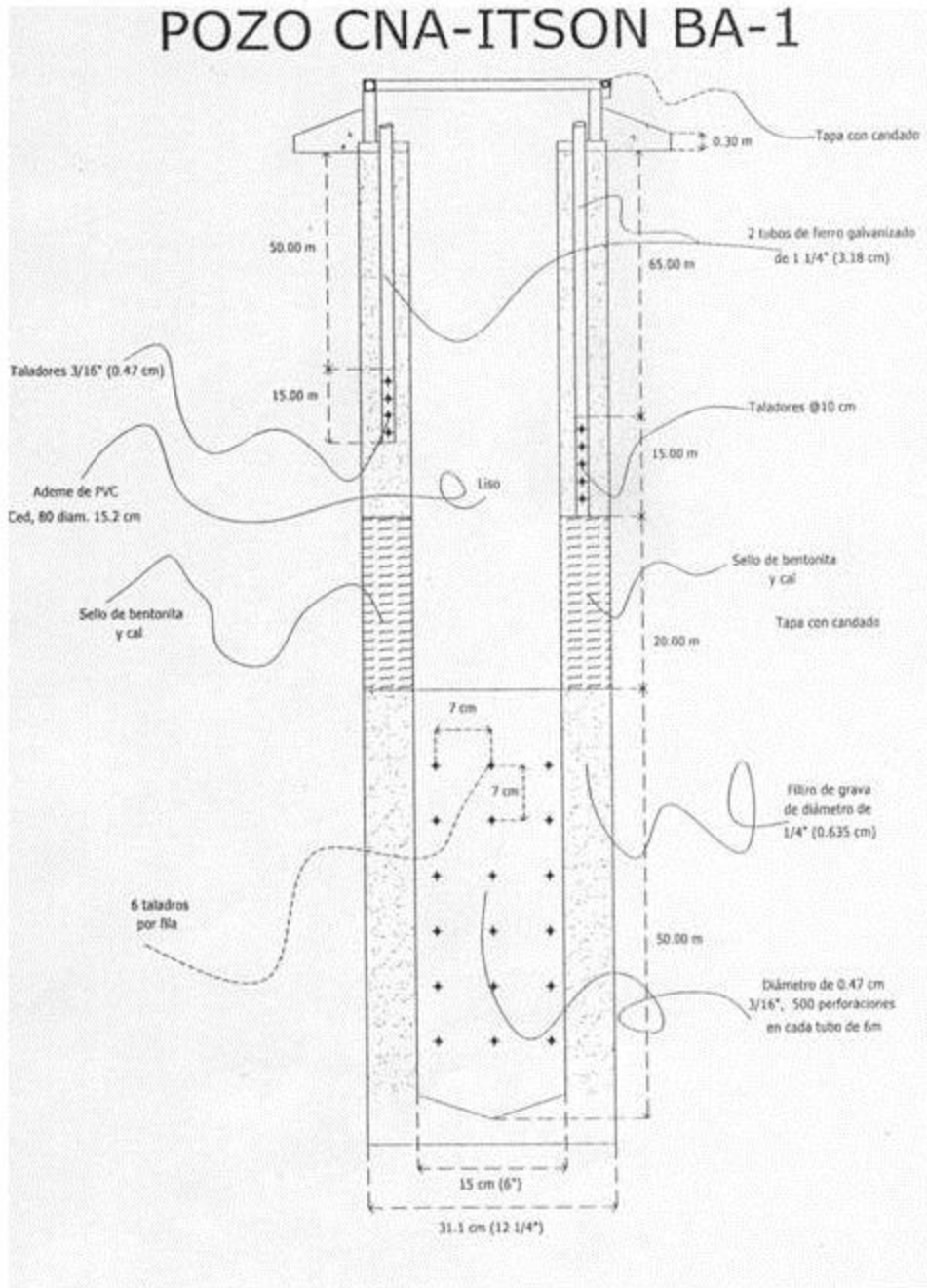


Figura 2. Corte de Terminación. Fuente: (CONAGUA, 2000)

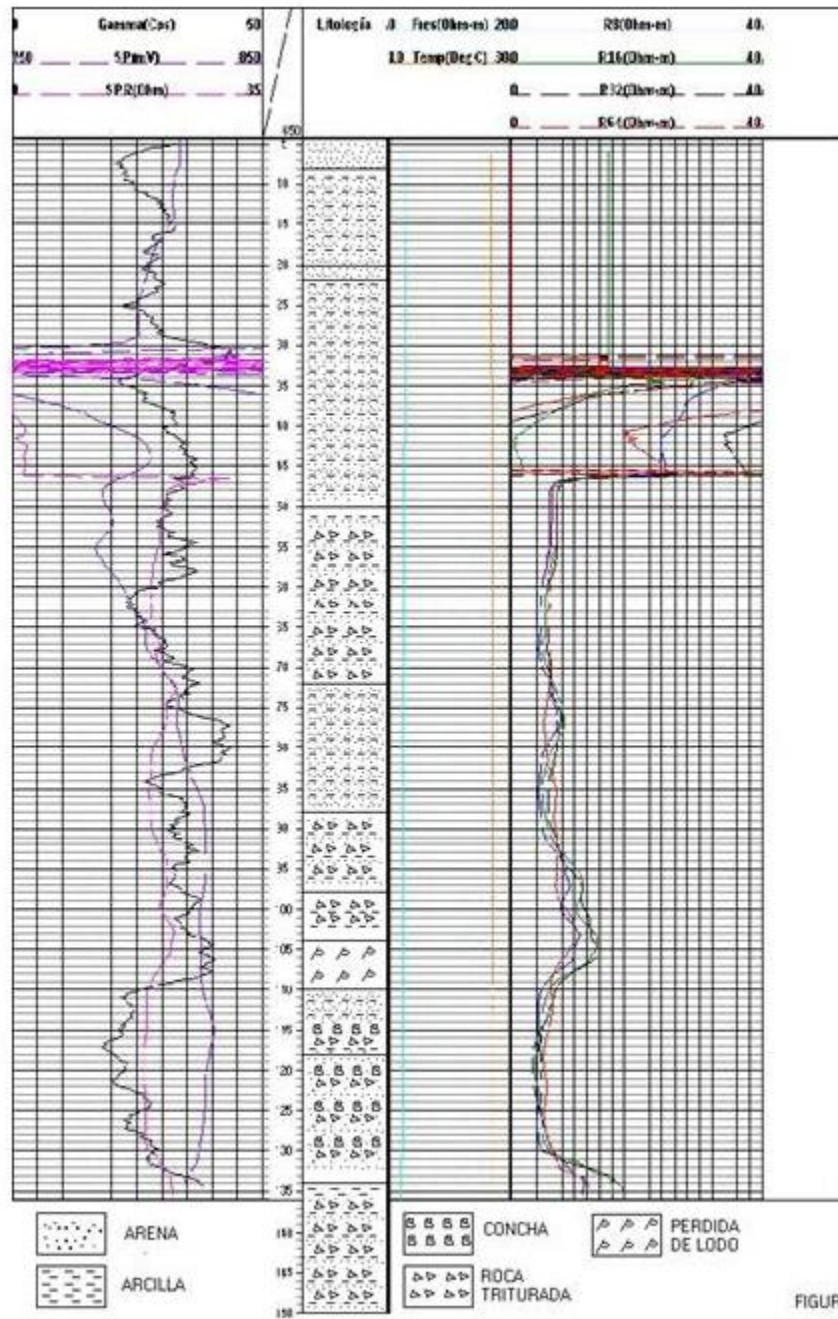


Figura 3. Registro eléctrico del pozo CNA-ITSON-BA1. (Fuente CONAGUA, 2000)

Dado el alto costo de este tipo de pozos conviene diseñar y mantener con todo cuidado un sistema de observación, desde la selección del sitio hasta el

empleo de los datos en modelos que se elaboren de acuerdo con objetivos claramente establecidos.

Cabe señalar que la propuesta de estudio mediante modelos de flujo y transporte mencionados, sin incluir los costos del sistema de observación, podría requerir un apoyo económico no mayor del 10% del costo de una planta desalinizadora piloto y sin embargo aportar información útil para diseño y operación de la barrera de pozos de suministro y defensa contra el avance de la intrusión, como para la misma planta desalinizadora.

IV. Conclusiones

La construcción y operación de una planta desalinizadora puede aportar volúmenes de agua en cantidad y calidad aceptables para consumo humano y uso industrial aprovechando el agua salobre contenida en los acuíferos afectados por la intrusión salina del mar, cumpliendo simultáneamente el propósito de detener el avance de dicha intrusión.

La perforación de pozos de observación con múltiples piezómetros independientes son de gran utilidad para los estudios de hidrología subterránea, particularmente en donde existe una batería de pozos salobres que requieren condiciones de salinidad estables para sostener los costos de desalinización del agua en un rango aceptable durante la vida útil de las instalaciones.

Dado el alto costo de dichos pozos conviene diseñar y mantener con todo cuidado un sistema de monitoreo que incluya pozos de observación con piezómetros independientes.

Aun incluyendo el costo del sistema de monitoreo, la elaboración de modelos para conocer el comportamiento de la interfase agua dulce-agua salada, la construcción, operación y mantenimiento de una barrera de pozos de bombeo; puede considerarse que el suministro de agua salobre de acuíferos a una planta

desalinizadora es una alternativa que conviene considerar frente a la desalinización de agua directa de mar.

Reconocimientos:

Al U.S. Geological Survey por las facilidades para visitar y obtener la información aquí mostrada, especialmente al grupo de modelos de la Oficina de Proyectos de San Diego del Centro de Ciencias del Agua de California: Eric G. Reichard, PhD, Randy Hanson, Dr. John Izbicki y Dr. Tracy Nishikawa; así como a Wes Danskin del U.S. Geological Survey por las visitas realizadas a las zonas de estudio e instalaciones en el Área de San Diego, a Michael E. Garrod, P.E. de Sweetwater Authority, Chula Vista, CA, por las facilidades y orientaciones durante la visita a las instalaciones de la Planta Richard A. Reynolds, Groundwater Desalination facility.

V. Referencias

- Barlow, P.W., & Reichard, E.G. (2010). Salt water intrusion in coastal region of North America. *Hydrogeology Journal* Vol. 18 Number 1, Feb. 2010. Pp-247-260.
- Borgo, G., Vega, E.L., & Castillo, J. (2001). *Simulación numérica de la intrusión salina del acuífero costero de Guaymas, Sonora*. XXXIV Congreso Nal. Soc. Mat. Mex. P. 74.
- Carrera, P.M. (2010). Dynamics of negative hydraulic barriers to prevent seawater intrusion. *Hydrogeology Journal* Vol. 18 Number 1, Feb. 2010. pp-95 a 105.
- CONAGUA. (2000). *Estudio de disponibilidad y actualización hidrogeológica en los acuíferos de los valles de: el Yaqui, el Mayo, Boca Abierta y Guaymas, Sonora*. Elaborado para la Subgerencia General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua por el Instituto Tecnológico de Sonora.

Manjarrez, G.D. (2011). *Desarrollo y calibración de un modelo de intrusión salina en el acuífero del Valle de Guaymas, Sonora, utilizando los programas SEAWAT y PEST*. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias-Geología. Universidad de Sonora. Hermosillo, Son.

Quiñónez, P. J. (2005). *Barreras de pozos de inyección como medidas de control de la intrusión salina: Un caso de estudio en el Valle de Boca Abierta, Noroeste de México*. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en Administración de Recursos Hidráulicos. ITSON. Cd. Obregón, Son.

CAPÍTULO 8.

INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN SISTEMAS DE DESALINIZACIÓN EMPLEANDO EL SISTEMA DE ELECTRODIÁLISIS REVERSIBLE (EDR)

Oscar R. Arroyo

SUMARIO: *Electrodiálisis Reversible (EDR), Principio de Operación, componentes de una planta, Torre de Membranas, Módulo Hidráulico, Módulo de control, Conclusiones.*

Electrodiálisis Reversible (EDR)

Este proceso tuvo sus orígenes al finalizar la década de los años 40, con el descubrimiento de las membranas transportadoras de iones, por la compañía GE Ionics, en 1954 la electrodiálisis (ED) se usó comercialmente, por primera vez para la desmineralización de aguas salobres en Saudi Arabia. Tuvo su mayor desarrollo cuando se descubrió y aplicó la inversión de la polaridad al proceso (EDR), en los años 70.

Este cambio permitió que a partir de esa década la aplicación de la electrodiálisis se convirtiera en un proceso continuo y comercial. Su desarrollo hasta la fecha ha sido tal que, si en 1970, se contaba con unas cuantas plantas que producían a nivel mundial 18,900 m³/d, en la actualidad se cuenta con más de 2000 plantas produciendo continuamente un total estimado de 800,000 m³/d.

En México en particular se cuenta con instalaciones de plantas individuales de EDR con una capacidad de 30,000 m³/d. Dos de las características fundamentales del EDR son las de producir una agua con el nivel adecuado de sales y el de no usar productos químicos o usarlos en muy poca cantidad. Los productos químicos, en este proceso, son sustituidos por electricidad.

Principio de Operación

El principio de operación del proceso de electrodiálisis es el siguiente:
Vamos a suponer que tenemos una cuba electrolítica.

En esta cuba tenemos el electrodo negativo o cátodo y el electrodo positivo o ánodo. Vamos a suponer también que en la cuba tenemos una solución de sal (cloruro de sodio) en agua. Los electrodos están conectados a una fuente de corriente directa y tenemos también un interruptor en el circuito. Se sabe que cuando ponemos una sal en agua, generalmente se disuelve y al disolverse se ioniza, es decir, la molécula se divide en sus dos aniones, en este caso el Ion Na^+ y el Ion cl^- , los cuales quedan libres y en movimiento, vagando sin ninguna orientación.

Si en estas condiciones establecemos la circulación de corriente, cerrando el interruptor, ocurre que debido a la polaridad de los electrodos los iones cl^- o negativos, tenderán a orientarse y dirigirse al ánodo y en los iones Na^+ o positivo tenderán a dirigirse al cátodo. Este es el principio típico de un proceso electrolítico.

Componentes de una Planta

Una planta de electrodiálisis, está formada principalmente por tres módulos:

1. La torre de membranas o módulo de desmineralización
2. La plataforma hidráulica o modulo hidráulico
3. Tablero o módulo de control

Torre de Membranas

La torre de membranas es donde se efectúa la desmineralización o desalinización. El componente fundamental de una torre de membranas es una celda, la cual está formada por:

- a) Una membrana catiónica

- b) Un espaciador de polietileno
- c) Una membrana aniónica
- d) Un espaciador de polietileno

Los espaciadores son dispositivos equivalentes a los compartimientos fabricados de polietileno de baja densidad y en forma de rejilla. Por estos espaciadores fluye el agua entre las dos membranas. Dependiendo de su posición, puede ser de solución concentrada o solución diluida (producto).

Una torre de membranas generalmente está formada de 600 celdas, apiladas una encima de otra. En cada extremo de la torre se tiene un electrodo, una placa de PVC y una placa de metal.

Módulo Hidráulico

Formado por una estructura metálica en la cual están montadas las tuberías, las válvulas, conexiones, bombas, instrumentos, muestreo y un filtro de cartuchos para retener las partículas mayores de 10 micras, además de otros dispositivos.

En este módulo se manejan las diferentes corrientes de agua, es decir: alimentación, desmineralizada (producto), recirculación de concentrado, electrodos y el enjuague de la inversión de la polaridad (producto fuera de especificación)

Normalmente en este módulo se encuentra también instalado el tablero de control hidráulico, que incluye los manómetros, indicadores de flujo, etc.

Módulo de Control

El módulo de control corresponde a los tableros y gabinetes en donde se encuentran localizados todos los dispositivos eléctricos tales como: PLC, interruptores, rectificadores, arrancadores, relevadores, programadores, luces

indicadoras de la operación, así como los indicadores de conductividad, botoneras y perillas para la operación automática de la planta.

Conclusiones

De la variedad de los procesos para tratamiento de agua, la electrodiálisis ha demostrado ser una de las mejores opciones tomando en cuenta que es el único proceso al que no se le adiciona, ningún producto químico que pueda alterar o contaminar el agua que se está tratando y por lo tanto el agua producto.

Dentro de las múltiples ventajas que tiene la electrodiálisis en comparación con otros procesos de membranas o resinas de intercambio iónico, podemos mencionar las siguientes:

1. La calidad del agua producto es constante con respecto a los contenidos de sales.
2. La cantidad del agua producida es constante y continua.
3. En caso de ser necesaria la adición de productos químicos, esta se efectúa en la alimentación de concentrado que en la ELECTRODIALISIS está completamente separado del circuito de agua producto y por lo tanto este no es contaminado.
4. Por la misma razón anterior el sabor del agua original no es alterada. Las membranas tampoco le imparten ningún sabor.
5. El contenido de sales en el agua producto puede modificarse y ajustarse dentro de ciertos límites mediante el ajuste de una perilla que varía el voltaje de corriente.
6. Como la operación es sencilla, automática y simple, no se necesita personal especializado, soportando inclusive errores en su operación.
7. Debido a que prácticamente no se le dosifican productos químicos, se evitan los problemas asociados con esto, tales como efluentes de desechos ácidos

y/o alcalinos, manejo de los productos químicos, etc. Y los costos de operación son lógicamente muy bajos.

8. La operación es continua y confiable durante las 24 horas del día y no existen los problemas asociados con una elevación de la presión en las membranas, por lo cual su mantenimiento es sencillo.
9. La limpieza química o bacteriológica de las membranas se efectúa rápidamente, pudiéndose usar soluciones de cloro hasta de 10 ppm sin dañar las membranas.

Para más información sobre EDR dirigirse:

GE INFRASTRUCTURE

WATER & PROCESS TECHNOLOGIES

(GE Ionics)

65 Grove St.

Watertown, MA 02472

617-926-2500

www.ge.com

DESALACIÓN. UN MAR DE OPORTUNIDADES, se terminó de editar en el Instituto Tecnológico de Sonora, en Cd. Obregón, Sonora, México, en junio de 2013.

Su tiraje fue de 50 ejemplares impresos más sobrantes para reposición.

Además se ha puesto en línea en la página: www.itson.mx/publicaciones



ITSON
Educar para
Trascender