

94



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

Facultad de Ingeniería



**LA DESALACION COMO ALTERNATIVA
DE ABASTECIMIENTO DE AGUA
PARA LAS CIUDADES COSTERAS
DE BAJA CALIFORNIA NORTE**

TESIS

que para obtener el título de
Ingeniero Civil

presenta

Rodrigo Morales Mújica

290404

México, D.F., agosto de ~~1999~~

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/018/99

Señor
RODRIGO MORALES MUJICA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. RAFAEL B. CARMONA PAREDES , que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"LA DESALACION COMO ALTERNATIVA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA
PARA LAS CIUDADES COSTERAS DE BAJA CALIFORNIA NORTE"**

INTRODUCCION

- I. SITUACION DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA REGION
- II. ESTADO DEL ARTE DE LA DESALACION. MEXICO Y EL MUNDO
- III. ANALISIS DE FACTIBILIDAD DE DESALACION PARA LA PENINSULA DE BAJA CALIFORNIA
- IV. ALTERNATIVAS DE ABASTECIMIENTO A CORTO PLAZO
- V. ACUERDOS BINACIONALES. COOPERACION CON EL CONDADO DE SAN DIEGO
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 14 de abril de 1999.

EL DIRECTOR

ING. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg.

A mi madre. La mujer más admirable que existe, mi motivo para querer ser mejor cada día, quien me ha enseñado que se puede vivir intensamente con la tranquilidad del deber cumplido. A ella, a quien le debo todo.

A mi padre. Mi héroe, mi ejemplo a seguir, de quien he aprendido que el luchar siendo congruentes con nuestra historia y nuestros ideales conduce necesariamente a la más grande de las victorias: la paz consigo mismo.

A Marta y Paulina. Por el rumbo que hemos trazado y que seguiremos trazando siempre juntos. Por el amor que hemos probado tenernos, por todo lo que las admiro.

A Frici, Natalia y Enrique. Por todas las risas, por lo orgulloso que me siento de ellos. A Elvira y Andrea, por la alegría de tenerlas a mi lado.

A mi familia García y Colomé, y a todos los que ello implica. Porque tengo la seguridad de que estaremos juntos por el resto de nuestros días. A Pablo, por ser ese guía espiritual. A mi pequeña maravilla, que me ha mostrado que todos los sueños y todos los ideales son alcanzables cuando se ama a corazón abierto. F.T.

A Juan Pablo, Laura, Pablo, Eduardo, Fernando, Yoatzin, Luis, Úrsula y la banda sideral toda. Seamos realistas, pidamos lo imposible.

A Paola, porque tanto trecho andado juntos hace de éste un triunfo compartido.

A Natzin y María Luisa, mis almas gemelas. A Erik, Jano, Daniel, Mots, Larissa y toda la gente madreña, cómplices en tanta vida.

A Mauricio y Toño, porque juntos cubrimos el primer tramo. A MOFCA, porque juntos construimos el segundo. El camino es más corto cuando se hace codo a codo.

A mi pasión, el más grande motivo de orgullo que tiene este país: la Universidad Nacional Autónoma de México.

Agradecimientos

A todos aquéllos quienes fueron mis maestros. El verdadero valor del proceso educativo está en las relaciones personales que se logran establecer entre los que aprendemos y quienes nos enseñan. Para ellos, toda mi admiración.

A la Facultad de Ingeniería. Por el espíritu de liderazgo, excelencia, responsabilidad y ética que busca inculcar en todos los que pasamos por sus aulas.

Al Instituto de Ingeniería y la Comisión Nacional del Agua, que hicieron en gran medida posible, con su apoyo y asesoría, la realización de este trabajo.

Al Dr. Rafael Carmona, quien me impulsó desde un principio en este proyecto. Sin su guía, comprensión, apoyo y perseverancia, la consecución de los objetivos trazados no hubiera sido posible. Por mucho más que esto, gracias.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser la cuna de todas las ideas y el verdadero escenario de la vida intelectual de este país. Porque en ella la ciencia y la cultura conviven día a día permeando a quienes la vivimos y la amamos. Porque el formar parte de ella fue y sigue siendo el sueño de toda mi vida, y porque su significado político y social me hacen hoy sentirme más universitario y más orgulloso que nunca.

Por mi raza hablará el espíritu.

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN	1
I. SITUACIÓN DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA REGIÓN.	
Introducción	6
I.1 Tijuana y el área de Rosarito.	9
I.1.1 Agua potable	
I.1.2 Drenaje y tratamiento de aguas residuales	
I.1.3 Administración de los servicios	
I.1.4 Perspectivas a futuro	
I.2 Ensenada	15
I.2.1 Agua potable	
I.2.2 Drenaje y tratamiento de aguas residuales	
I.2.3 Administración de los servicios	
I.2.4 Perspectivas a futuro	
II. ESTADO DEL ARTE DE LA DESALACIÓN. MÉXICO Y EL MUNDO.	
Introducción	18
II.1 Tecnología existente	
II.1.1 Ósmosis inversa	19
II.1.2 Destilación solar	29
II.1.3 Electrodialisis	37
II.2 Esfuerzos anteriores por desalar agua	46
II.3 Plantas modelo. La planta desaladora de Yuma	54
III. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE DESALACIÓN PARA LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA.	
III.1 Análisis técnico e hidráulico	60
III.2 Análisis económico	70

IV.	ALTERNATIVAS DE ABASTECIMIENTO A CORTO PLAZO.	
	IV.1 Reuso de agua	75
	IV.2 Agua repurificada	83
	IV.3 Ampliación del acueducto Río Colorado – Tijuana	88
	IV.3.1 Análisis estructural de tuberías de concreto reforzado con problemas de corrosión	94
V.	ACUERDOS BINACIONALES.	
	COOPERACIÓN CON EL CONDADO DE SAN DIEGO.	100
VI.	CONCLUSIONES.	108
	ANEXO A.	113
	ANEXO B.	119
	ANEXO C.	121
	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.	122

INTRODUCCIÓN

La región noroeste del estado de Baja California Norte ha sufrido históricamente de problemas de abastecimiento de agua. Se trata de una zona desértica, y como tal, los recursos acuíferos son escasos y de difícil acceso.

La problemática se agudiza en las ciudades costeras, Tijuana, Ensenada y Rosarito, por mencionar las más importantes. En particular, la ciudad de Tijuana se ha convertido en un punto clave desde el punto de vista económico y social, dada sobre todo la cercanía con la ciudad de San Diego, California. Tijuana se ha desarrollado de manera más o menos típica como puerto fronterizo, y la concentración de capitales y actividades diversas han desembocado en la inminente explosión demográfica. Hablamos de una población de alrededor de 1.5 millones de personas a la fecha, al tiempo que datos censales la ubican como la ciudad con los índices de crecimiento poblacional más altos del país, incluso superiores a los de macro urbes como Monterrey, Guadalajara y la Ciudad de México.

Desde luego, los antecedentes mencionados colocan al precario abastecimiento de agua en una posición de medular importancia. El desarrollo de cualquier asentamiento humano debe estar basado en la segura consecución del mencionado recurso, y aunque en los umbrales del siglo XXI aún hay regiones en nuestro país en las que la infraestructura existente es aún insuficiente, tal y como ocurre con la región en cuestión, debe ser una prioridad en el corto y mediano plazo revertir la situación y efectuar una planeación eficiente para asegurar la obtención de agua en las próximas décadas.

Para nadie es un secreto que en las próximas décadas las tecnologías encaminadas a la generación de recursos deben tomar un rumbo distinto. Las tendencias ecológicas dejarán de ser un discurso político, y deberán marcar en gran medida los rumbos a seguir. La Ingeniería tiene la enorme responsabilidad de responder al cambio de los tiempos con nuevas tecnologías, con nuevos métodos y criterios acordes con las necesidades de nuestro planeta.

De cara al nuevo milenio, hay dos aspectos que serán algo así como un termómetro de la capacidad del hombre por aprender a enfrentar sus necesidades con una actitud distinta. Uno de ellos es la producción de energía, y el otro el abastecimiento de agua.

Se habla mucho de energía renovable, y es que la manera en que producimos actualmente será insostenible a largo plazo. La quema de combustibles fósiles no podrá prolongarse más allá de las próximas décadas, y del mismo modo las reservas de uranio, indispensables en la generación eléctrica en plantas nucleares, tampoco son interminables. Pueden preverse como "energías del futuro" la energía solar, la eólica, la marítima; es decir, aquellas fuentes que se renuevan a sí mismas, cuya explotación no significa el agotamiento del recurso.

De la misma manera, la forma en que se explotan los mantos acuíferos hoy en día conducen a la inminente escasez de los mismos en el largo término. De manera equiparable a la producción energética, es obligatorio buscar fuentes renovables de abastecimiento. En este contexto es que en la zona desértica del noroeste de nuestro país ha aparecido en escena la desalación de agua marina como una opción que al menos requiere considerarse seriamente.

Tiempo atrás se han realizado ya algunos esfuerzos por buscar fuentes alternas de abastecimiento para la región. La demanda es cada vez mayor, y la contaminación de las fuentes tradicionales, tanto subterráneas como superficiales, evidencian la obligatoriedad de encontrar procedimientos alternos para la captación y el tratamiento de agua en los próximos años.

La alternativa a priori, como se mencionó anteriormente, parece ser la desalación de agua marina. Es bien sabido que en gran medida, el futuro de la humanidad estará asegurado por mucho tiempo cuando seamos capaces de aprovechar cabalmente las oportunidades que ofrecen los océanos. La fuerza de las mareas para generar electricidad, el cultivo de especies algáceas con fines alimenticios y, desde luego, la casi invaluable posibilidad de potabilizar de manera eficiente el agua del mar.

La humanidad ha producido agua dulce a partir del agua marina a lo largo de varios siglos. Las civilizaciones egipcia, hebrea y persa sentaron los precedentes

en materia de desalación. En el siglo IV a.C., tanto Aristóteles como Hipócrates promovieron el uso de destilación de agua marina para obtener agua dulce.

Los grandes viajes transoceánicos, y por tanto la necesidad de abastecer de agua dulce a naves marítimas que pasaban grandes periodos de tiempo mar adentro, impulsaron numerosos avances en tecnología de desalación. Durante el s.XVIII, las naves británicas y norteamericanas producían agua dulce a partir de destiladoras simples, usando el calor de las estufas del barco para destilar agua.

En los albores del presente siglo, comenzaron a usarse diversos tipos de plantas destiladoras, sobre todo en regiones áridas en todo el planeta. Los avances en las técnicas de desalación en los años sesenta redujeron considerablemente los costos, haciendo de la desalación un método viable de tratamiento de agua, estableciéndose plantas capaces de producir hasta 90 l/s de agua dulce. La producción mundial creció desde una producción de 2.6 m³/s en los sesenta hasta cerca de 45 m³/s a mediados de los setenta (*American Desalting Association*).

Aunque la desalación está lejos de ser una utopía, ya que existen cientos de plantas actualmente en función, no es hasta el momento una fuente viable dados los altos costos que el potabilizar agua marina supone. Una gota de agua desalada cuesta entre el doble y el quintuple del precio de una gota obtenida por métodos convencionales. Por lo tanto, deben considerarse en el corto plazo también algunas otras opciones. Las necesidades de abastecimiento en la península no pueden esperar al desarrollo tecnológico, y por tanto deben considerarse fuentes alternas aplicables en lo inmediato. Tales son la recuperación de aguas tratadas, los tratamientos avanzados e incluso la ampliación de la capacidad del suministro de agua importada de otra región a través de, principalmente, el acueducto del Río Colorado.

De esta manera, el propósito de este trabajo de tesis es analizar las distintas posibilidades de abastecimiento de agua para las ciudades costeras de la zona noroeste de la península de Baja California, considerando como opción primaria la desalación, determinando a partir del estado del arte de esta tecnología el más adecuado nivel de aplicación de la misma.

El trabajo requiere de distintas ramas de la Ingeniería Civil, como son:

- a) Hidráulica. Los análisis concernientes a la cantidad de agua que reciben las distintas ciudades en estudio, así como las deficiencias en la distribución de las mismas requieren de consideraciones desde el punto de vista hidráulico. Asimismo, la potencial necesidad de nuevos acueductos o bien de la ampliación de la capacidad de los existentes son evidente campo de acción de esta disciplina.
- b) Sanitaria. Es quizás el eje medular en este trabajo, pues el objetivo final es transformar en aprovechables aquellas fuentes que en sus condiciones actuales no lo son. Las consideraciones en cuanto a los niveles de tratamiento que se deben alcanzar, así como los procedimientos que se propondrán con tal fin, serán centrales en el desarrollo de la tesis.
- c) Ingeniería de costos. Desde luego, más allá de las implicaciones técnicas y sociales, las conclusiones del trabajo estarán íntimamente ligadas con factores decisores de tipo económico. La factibilidad económica de las distintas alternativas que se analizarán será el criterio que descarte o bien impulse a las mismas.
- d) Planeación. La cabal comprensión del fenómeno poblacional que afecta a la ciudad de Tijuana, así como las implicaciones que ello supone sobre el abastecimiento de agua, serán fundamentales como punto de partida en cuanto a las dimensiones de los proyectos alternativos de abastecimiento.

Es importante mencionar que el presente trabajo se hará a través del Instituto de Ingeniería y en estrecha comunicación con la Comisión Nacional del Agua. Se tomarán muy en cuenta todos los avances hechos por dichas instituciones con el fin de que la tesis sea verdaderamente retroalimentadora de los mismos. La intención última es la presentación de los resultados ante la CNA, con el fin de que se asiente como un avance más en los esfuerzos por proveer agua de manera segura y eficaz para la península de Baja California.

Objetivos

1. Establecer las condiciones actuales de abastecimiento de agua potable para la zona costera del estado de Baja California Norte. Asimismo, crear un marco general que contemple la situación mencionada anteriormente con proyecciones al año 2010.
2. Analizar el estado de las fuentes de abastecimiento actuales, así como los volúmenes deficitarios que podrían presentar éstas en cuanto a su capacidad y respecto a la demanda proyectada de cara a los próximos años.
3. Elaborar un estudio comparativo de las distintas tecnologías actualmente en funcionamiento en lo que a desalación de agua salada se refiere, contemplando aspectos técnicos, sociales y económicos.. A partir de ello, decidir cuál de ellas es más susceptible de ser implementada para alimentar a la zona de estudio.
4. Analizar la viabilidad económica de la desalación como alternativa de abastecimiento para Baja California Norte, a partir del estudio de la tecnología seleccionada.
5. Explorar en distintas opciones de abastecimiento de agua, preferentemente de manera que complementen a la opción primaria estudiada: la desalación.
6. Establecer parámetros que, con base en el desarrollo del trabajo de tesis, permitan hacer recomendaciones que sustenten a la desalación como alternativa de abastecimiento de agua potable en la zona.

CAPÍTULO I.

SITUACIÓN DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA REGIÓN.

Introducción

El estado de Baja California Norte presenta una situación poblacional muy peculiar. La totalidad de las ciudades de importancia se encuentran cercanas a la frontera norte, dejando el resto del estado con concentraciones demográficas insignificantes. La división municipal es acorde a esta característica; el municipio de Ensenada ocupa una gran parte del estado, si bien la población que concentra es mucho menor a la de los municipios de Tijuana y Mexicali, por ejemplo. Las ciudades más importantes están prácticamente a nivel del mar, incluso Mexicali si bien no se trata de una población costera. Caso contrario es el de Tecate, cabecera del municipio del mismo nombre, que se encuentra a los pies de la Sierra de San Pedro Mártir, a una elevación de 540 m.s.n.m.

La entidad presenta casi en su totalidad terreno árido. Las sierras ocupan casi el 80% de su superficie, mientras que las postrimerías del Desierto de Altar, en donde se encuentra la capital Mexicali, ocupan otro 15%. La distribución climática del territorio norcaliforniano, según datos del Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), se muestran en la siguiente tabla. En ella se aprecia que puede considerarse como seco, en distintos grados, más del 93% del estado.

Tabla 1.1. Climas. Estado de Baja California Norte.

Tipo o subtipo	% de la superficie estatal
Templado subhúmedo con lluvias en invierno	2.33
Semifrío subhúmedo con lluvias en invierno	4.12
Seco templado	24.31
Muy seco muy cálido y cálido	19.17
Muy seco semicálido	34.13
Muy seco templado	15.94

Si bien en la zona que se estudiará las temperaturas no son extremosas (la estación meteorológica de Ensenada registra una temperatura anual promedio de 18.3°C entre 1984 y 1997, según registros de la Comisión Nacional del Agua, CNA, habiendo sido en 1997 la temperatura mensual más alta de 24.3°C), sí se trata de regiones áridas. Las precipitaciones totales mensuales apenas alcanzan apenas 80 mm en los meses de diciembre y enero, mientras que entre mayo y agosto, la época más calurosa, son prácticamente nulas.

La cuenca hidrológica en que se localiza la zona de estudio se denomina Baja California Noroeste (Ensenada), con las subcuencas Arroyo Escopeta – Cerro San Fernando, Arroyo La Ánimas – Arroyo Santo Domingo y Río Tijuana – Arroyo de Meneadero. El único cuerpo de agua natural del estado es la Laguna Salada, en el municipio de Mexicali. Los otros dos son artificiales: la presa El Carrizo, en las inmediaciones de Tecate y la presa Abelardo L. Rodríguez, en Tijuana.

En el Anexo A de este trabajo de tesis se muestran las cartas geográficas de la entidad. Es sabido que en Baja California el agua es un recurso muy escaso, por lo que su uso racional se ha convertido en una prioridad estatal. Adicionalmente conducirla y distribuirla tiene altos costos y problemas técnico – operativos que sólo pueden ser resueltos con la aplicación de las más avanzadas tecnologías.

Se piensa equivocadamente que por las dotaciones del Río Colorado la ciudad de Mexicali y su zona agrícola carecen de problemas en el suministro del vital líquido, sin embargo hay que destacar que las aguas de este afluente no deben considerarse privilegio de alguna zona específica del Estado sino la reserva de este recurso para afrontar las necesidades de toda la entidad y los retos que implican su desproporcionado crecimiento demográfico, comercial e industrial.

En materia de agua Baja California enfrenta hoy un doble reto, por un lado la escasez y costo del agua obligan a obtener los más altos indicadores de cobertura, eficiencia y cultura en el uso del agua a nivel nacional e internacional; por otra parte el crecimiento demográfico desmedido nos plantea la necesidad de atender con nuevas fuentes de abastecimiento los déficits que se presentarán principalmente a partir del año 2002. Ambas acciones tienen un alto impacto económico y social.

En cuanto a su importancia social, es de todos conocido que el agua potable y el alcantarillado son el detonador en la cadena de los servicios públicos que permiten elevar la calidad de vida de la población. A partir de ellos, se puede pensar en el desarrollo de servicios tales como la pavimentación, la energía eléctrica, el sistema de vialidades, el transporte, la seguridad pública, la recolección de basura, la salud y la educación.

I.1 TIJUANA Y EL ÁREA DE ROSARITO

I.1.1 Agua potable

La ciudad de Tijuana obtiene el suministro de agua fundamentalmente de tipo superficial, provenientes de las presas Abelardo L. Rodríguez y El Carrizo, que recibe el influente proveniente del acueducto del Río Colorado. El agua recibe potabilización en las plantas Abelardo L. Rodríguez y El Florido. Adicionalmente se cuenta con un suministro pobre de aguas subterráneas de los pozos de la ciudad de Tijuana. En el Anexo B se presentan las características principales de las presas El Carrizo y Abelardo L. Rodríguez, y de la planta potabilizadora El Florido.

El agua del Río Colorado es llevada a Tijuana por medio de un sistema con capacidad de transmisión de 4 000 l/s, el acueducto Río Colorado – Tijuana. Dicho volumen llega a la planta potabilizadora El Florido que cuenta con una capacidad de potabilización de 4 000 l/s. La presa Abelardo L. Rodríguez controla el flujo de los ríos Tijuana y Las Palmas, el agua que regula puede ser tratada en la planta del mismo nombre, con una capacidad de 750 l/s, y también en El Florido. El suministro de aguas subterráneas proveniente de los pozos sobre los ríos Tijuana y Alamar, con capacidad de 258 l/s y producción promedio de 77 l/s constituye la última de las fuentes de abastecimiento de la ciudad. De manera promedio durante 1997, se suministró a la ciudad un gasto de 2.836 m³/s.

En la figura anexa I.3 se presentan las zonas con cobertura de agua potable, así como aquellas que no tienen servicio. La cobertura de servicio alcanza un 89%.

La problemática que se presenta en el sistema es:

- Falta cobertura de servicio
- Rigidez en la operación
- Riesgos en el sistema de distribución
- Falta capacidad de regulación en tanques
- Déficit próximo de fuentes de suministro
- Calidad del agua que impacta en la potabilización
- Deficiencia en la operación de la red de distribución

I.1.2 Drenaje y tratamiento de aguas residuales

La cobertura anual de drenaje es aproximadamente del 67% de la población. La mayor parte de las descargas fluyen hacia el Río Tijuana y se bombean a la planta de tratamiento de San Antonio de los Buenos. La capacidad de tratamiento de la planta de San Antonio es de 750 l/s. El efluente de la planta de tratamiento conjuntamente con la parte de agua que no puede ser tratada es conducido por un canal abierto hacia el sur y descargado al mar.

El agua residual generada por la ciudad de Tijuana es actualmente del orden de 2000 l/s, de esta manera, el servicio de tratamiento prestado es tan sólo del 38%.

La problemática detectada en este sentido indica:

- Baja cobertura de servicio
- Prácticamente, ausencia de tratamiento con las implicaciones que genera en cuanto a salud de los habitantes, contaminación de playas y bahías, disminución del crecimiento como centro turístico y problemas respecto a acuerdos binacionales.
- Deficiencia en capacidad de drenaje pluvial
- Deficiencia en la operación de sistema de alcantarillado

En la figura I.4 se presenta el sistema de alcantarillado, así como las áreas que cuentan con servicio.

I.1.3 Administración de los servicios

La eficiencia de medición es del 71%, contando con 201 195 medidores instalados, no todos en funcionamiento, de un total de 166 055 tomas, de las cuales 93% corresponden al servicio doméstico.

La producción media mensual de agua potable es de 7.45 millones de metros cúbicos, de los cuales se factura el 75%, y de este último, se cobra el 87%. La tarifa media, \$6.55/m³, corresponde a una de las más altas de la República, por las dificultades asociadas con el suministro.

La problemática de la administración del servicio, se concentra en:

- Errores en la medición
- Pérdidas de agua en la distribución
- Pérdidas económicas en la cobranza
- Altos niveles de tarifa

1.1.4 Perspectivas a futuro

El crecimiento esperado de la ciudad de Tijuana se muestra en la gráfica siguiente. Los datos corresponden a estimaciones de la CNA (Plan Maestro para desarrollo de la región), a través del método aritmético simple, considerando un crecimiento anual constante de cerca de 650 000 habitantes, lo cual implica una tasa promedio de 4% anual.

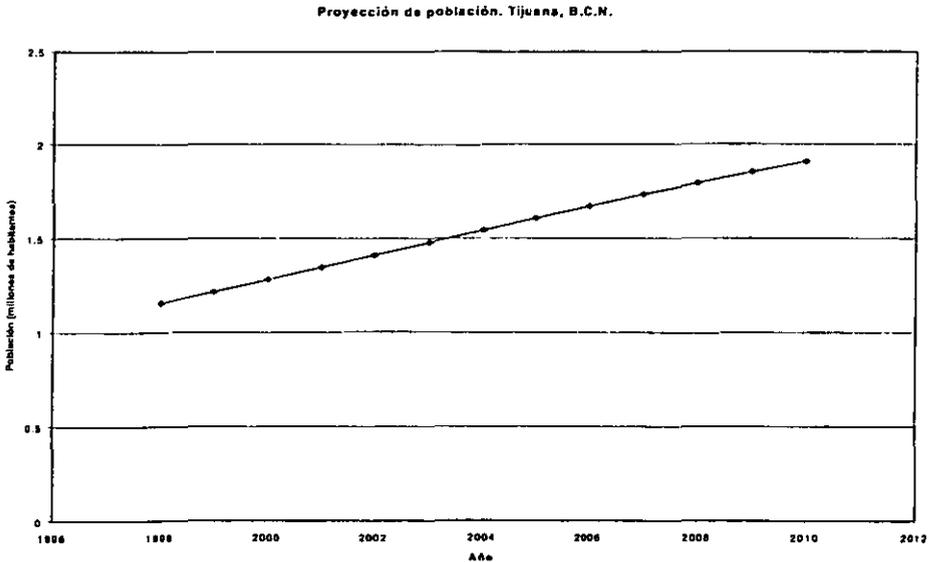


Figura 1.1

La demanda esperada de agua se muestra tabular y gráficamente a continuación, así como una comparativa con la oferta de agua disponible. Se añade en la tabla la aportación de agua residual, considerando una aportación del 80% a partir del agua demandada, los datos serán de interés en el desarrollo posterior del trabajo, ya que en el capítulo IV se incluirán alternativas de abastecimiento como lo son agua recuperada y repurificada, cuyos influentes son precisamente aguas residuales.

En la gráfica puede observarse que a partir del año 2005 la oferta de agua potable será insuficiente, llegando a niveles deficitarios de más de 800 l/s en el año 2010.

Cabe destacar que el análisis presentado corresponde enteramente a la CNA, si bien en el desarrollo posterior de la tesis se hará un desarrollo similar con criterios propios.

Tabla 1.2

Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Población ($\times 10^6$)	1.152	1.216	1.280	1.346	1.412	1.477	1.542
Dotación (l/hab/día)	250	250	250	250	250	250	250
Demanda (l/s)	3 332	3 517	3 705	3 895	4 084	4 274	4 463
Oferta (l/s)	4 700	4 700	4 700	4 700	4 700	4 700	4 700
Agua residual (l/s)	2 666	2 814	2 964	3 116	3 267	3 419	3 570

Año	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Población ($\times 10^6$)	1.607	1.670	1.732	1.793	1.851	1.907
Dotación (l/hab/día)	250	250	250	250	250	250
Demanda (l/s)	4 650	4 834	5 013	5 188	5 358	5 520
Oferta (l/s)	4 700	4 700	4 700	4 700	4 700	4 700
Agua residual (l/s)	3 720	3 867	4 010	4 150	4 286	4 416

Oferta / Demanda de agua potable. Tijuana, B.C.N.

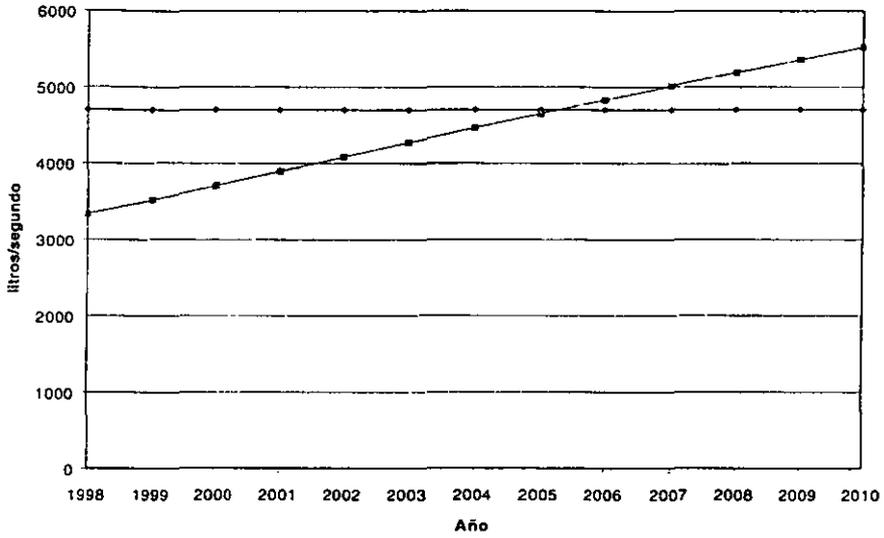


Figura 1.2

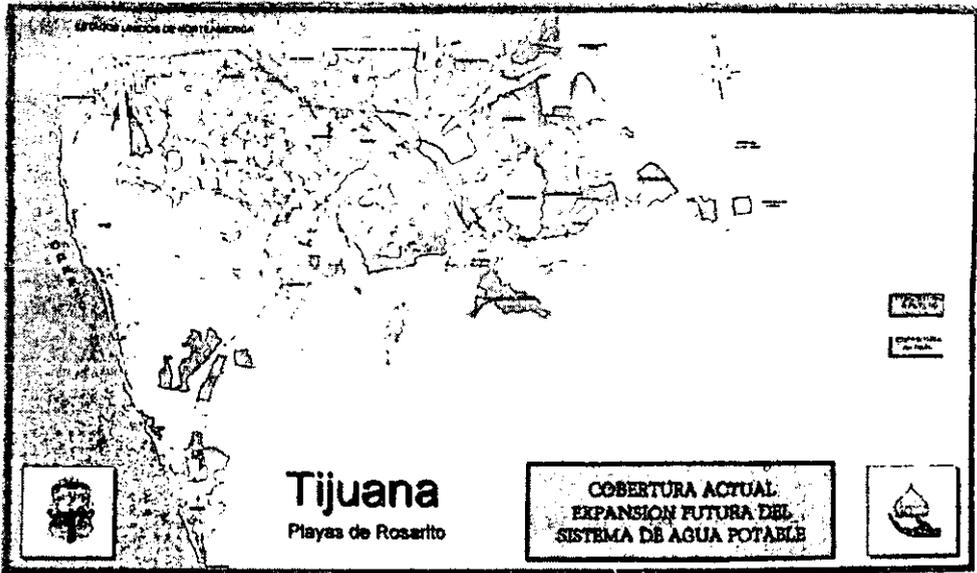


Figura 1.3 Cobertura de servicio de agua potable. Tijuana, BCN.

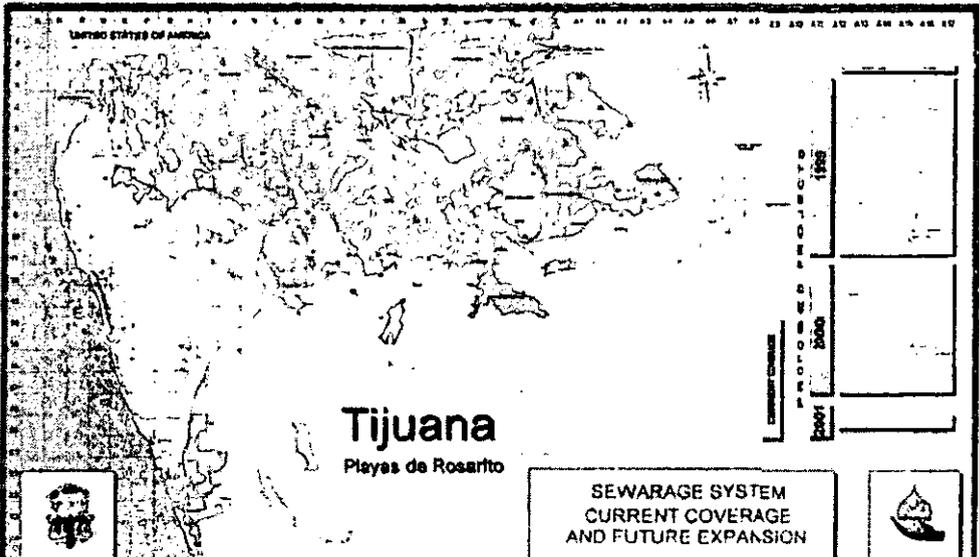


Figura 1.4 Sistema de alcantarillado. Tijuana, BCN.

I.2 ENSENADA

I.2.1 Agua potable

El abastecimiento se lleva a cabo utilizando fuentes superficiales y subterráneas. La fuente superficial está constituida por la presa Emilio López Zamora de la cual se extraen 110 l/s. La subterránea está constituida por la explotación de los acuíferos de Maneadero, Zona Urbana de Ensenada y Valle de Guadalupe.

La conducción importante en la ciudad se realiza por medio de dos líneas, una que une al Valle de Guadalupe con los tanques receptores Morelos, de 35 km de longitud, y otra que une a la captación del Valle de Maneadero con el cárcamo de bombeo Altavista, de 12 km de longitud.

El agua suministrada no pasa por procesos de potabilización más que la desinfección por cloración en los tanques y cárcamos de bombeo, pozo Maneadero 5 y en el Valle de Guadalupe, antes de enviarla hacia el acueducto Morelos. El gasto de extracción medio es de 649 l/s.

La problemática detectada indica:

- Baja cobertura en zonas aledañas a la ciudad.
- Deficiencia en la oferta
- Deficiencia en el servicio y la operación

I.2.2 Drenaje y tratamiento de aguas residuales

La cobertura actual del servicio de alcantarillado es del 60%, correspondientes a 28 000 descargas registradas. Por su parte, el tratamiento disponible en la ciudad es de 310 l/s, distribuidos en dos cuencas: El Sauzal con 60 l/s y El Gallo con 250 l/s. A la segunda planta le llega la descarga total de 310 l/s. La problemática del sistema indica:

- Baja cobertura de alcantarillado, tanto en la zona actual como en la de expansión
- Deficiencia en la operación del sistema de colectores
- Capacidad de tratamiento insuficiente
- Riesgo de inundaciones por deficiencias en drenaje pluvial

1.2.3 Administración de los servicios

La eficiencia de la medición es del 77%, se disponen de 59 214 cuentas, de las cuales 91% le corresponden a uso doméstico. La producción promedio mensual de agua potable es de 1.71 millones de metros cúbicos, de los cuales se factura el 74% y de éstos se cobra el 67%. La tarifa promedio de la prestación del servicio asciende a \$6.17/m³. La problemática se concentra entonces en:

- Falta de medición
- Pérdidas de agua en la distribución
- Pérdidas económicas en la cobranza

1.2.4 Perspectivas a futuro

El crecimiento esperado de la ciudad de Ensenada, acorde con las expectativas de actividad económica en la zona, se presentan a continuación. Los datos provienen del Plan Maestro de CNA, y en ellos se considera un crecimiento demográfico anual constante de algo más de 8000 habitantes, lo cual representa un incremento de alrededor de 2.5% anual. De forma análoga al caso de Tijuana, en el capítulo III se hará un análisis análogo en la búsqueda de una población de proyecto más certera.

Proyección de población. Ensenada, B.C.N.

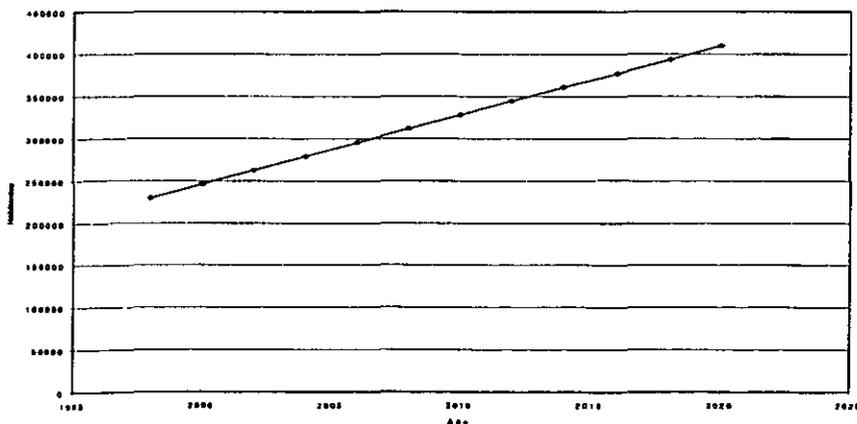


Figura 1.5

A continuación se muestra una gráfica en la que se comparan a lo largo de los años venideros la oferta y la demanda de agua potable para la ciudad de Ensenada. La tendencia que puede observarse en la misma es que desde la actualidad existen deficiencias en el suministro de agua potable, por lo que resulta evidente la necesidad de buscar nuevas fuentes de abastecimiento que entren en operación a partir de este momento.

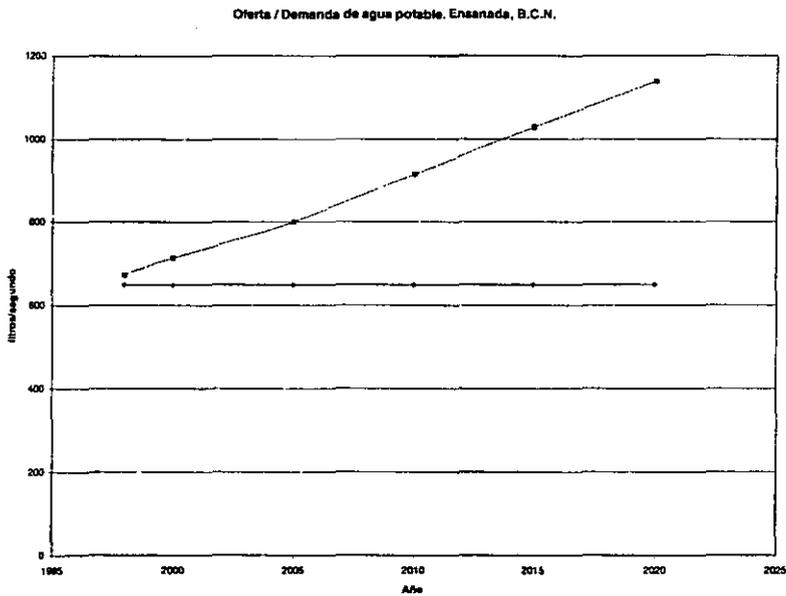


Figura 1.6

CAPÍTULO II.

ESTADO DEL ARTE DE LA DESALACIÓN. MÉXICO Y EL MUNDO.

Introducción

La desalación (o desalinización) ha sido utilizada ampliamente por países con carencias en cuanto al suministro para aumentar sus fuentes de agua potable. En la actualidad, el conjunto de las plantas desaladoras en todo el mundo pueden producir alrededor de 150 m³/s de agua dulce, equivalente a más de cien litros al día para cada habitante de nuestro país. La mayoría de las plantas se abocan a dos mercados principales: potabilizar agua salobre (moderadamente salada) extraída del subsuelo, un proceso bastante más económico que el de desalar agua marina; y producir agua de calidad adecuada para usos industriales.

El proceso consiste en eliminar sal y otros contaminantes (tales como metales disueltos, biomasa o microorganismos) susceptibles de ser eliminados por alguno de los métodos de desalación. Éstos se usan con el fin de mejorar la calidad de aguas duras con altas concentraciones de magnesio y calcio, aguas salobres con niveles moderados de sal y agua marina.

Desalar consiste en separar agua salina en dos productos: agua dulce y agua con alto contenido de sales o salmuera. Dicha separación puede lograrse a través de una sucesión de procesos, entre los cuales los más usados son los procesos térmicos y los de membrana.

Ningún proceso desalador es "el mejor". Un cierto número de factores entran en juego en el momento de decidir la técnica a utilizar. Estos factores incluyen la calidad del agua de la fuente, la cantidad y calidad deseadas en cuanto al producto final, las condiciones energéticas bajo las cuales se vaya a operar y las posibilidades en cuanto a la disposición final de los desechos.

II.1 TECNOLOGÍA EXISTENTE

II.1.1 Ósmosis inversa

La ósmosis es una característica natural de todos los fluidos que contienen algún soluto. Se trata de la tendencia que éstos presentan a igualar la concentración de soluto entre dos cuerpos líquidos separados por alguna barrera. Por ejemplo, si tenemos dos cuerpos de agua con distintas concentraciones de, digamos, azúcar disuelta en ellas, separados por una barrera semipermeable o permeable (es decir, que puede ser atravesada por las moléculas de agua en uno o ambos sentidos), el solvente (en este caso agua) buscará igualar la concentración a ambos lados de la barrera traspasándola.

De esta manera, cualquier líquido que funcione como solvente en una solución, presentará una característica que se llama presión osmótica. Esta presión crece con la concentración de soluto y significa la capacidad potencial que tendrá el líquido de atravesar una barrera, fluyendo de menor a mayor presión osmótica. Si interponemos una membrana entre dos soluciones con distintas concentraciones de soluto (distinta presión osmótica a cada lado de la barrera), la diferencia de presiones podrá equipararse a una diferencia de potencial. El agua tenderá a atravesar la membrana del cuerpo con menor concentración al de mayor concentración (de menor a mayor presión osmótica), buscando así igualar la concentración a ambos lados de la membrana.

La presión osmótica es un fenómeno ampliamente estudiado, por ejemplo, en la biología. Ese comportamiento característico del agua como solvente es utilizado por las células en su interacción con el exterior, en el intercambio de nutrientes y la autorregulación del cuerpo celular. En aplicaciones tecnológicas, el principio resulta sumamente útil y es relativamente sencillo medir la diferencia de presiones a ambos lados de una membrana. Si colocamos a un lado de una membrana una disolución con concentración definida, y al otro, disolvente puro, se podría construir un osmómetro de tal modo que un pistón en la disolución pudiera aplicarle a ésta una presión, con el fin

de evitar el flujo de agua pura del lado del disolvente. De esta manera, la presión que se tuviera que aplicar al pistón sería igual a la presión osmótica.

En resumen, la ósmosis es simplemente un ejemplo de la tendencia natural de los sistemas a pasar en forma espontánea a un sistema de menor energía.

Ahora, supongamos que elevamos la presión del lado de la membrana que tiene mayor concentración. Si la presión en el lado de la solución concentrada se incrementa por encima de la presión osmótica, la dirección del flujo se invierte. Así, por efecto de esta presión aplicada, *obligamos* al disolvente a fluir *en sentido contrario* al que lo haría normalmente. Lo que estamos haciendo es el efecto inverso a la característica natural que llamamos ósmosis, y a tal proceso se le llama, de manera lógica, *ósmosis inversa*.

La ósmosis inversa es el proceso por medio del cual al aplicar una presión a un cuerpo de agua separado de otro por una membrana, se obliga al líquido a fluir de mayor a menor concentración de soluto. El resultado es que de un lado de la membrana tendremos altas concentraciones de soluto, y del otro solvente semipuro. Se puede decir que es un proceso equivalente a la filtración, o siendo más estrictos, a la hiperfiltración; mientras que los filtros convencionales llegan a tener diámetros de poro de unas decenas de micras, las membranas que se utilizan en la desalación por ósmosis inversa pueden alcanzar diámetros del orden de décimas de micra inclusive.

El fin con el que se utiliza el proceso es el de disminuir la concentración de algún soluto no deseado en volúmenes acuíferos. Es decir, si tenemos agua contaminada con elementos orgánicos o inorgánicos, la ósmosis inversa nos auxilia en retener a un lado de una membrana las partículas suspendidas o disueltas, dejando pasar al otro moléculas de agua y obtener así agua clarificada. Las actividades en que el proceso puede ser de utilidad son muy diversas. Como ejemplo inmediato podemos mencionar el tratamiento de efluentes industriales, sea con fines de disposición o de recirculación.

La ósmosis inversa no es en absoluto una tecnología nueva, aunque quizás sí subutilizada. Tiene sus antecedentes teóricos a principios de siglo en los estudios de Reid y Breton, pero no fue sino hasta los años sesenta que se empezó a considerar una opción viable para aplicaciones principalmente industriales. Desde luego, su desarrollo tuvo que ser prácticamente paralelo al desarrollo tecnológico de las

membranas, conexión evidente entre el aparentemente simple concepto teórico y su no tan trivial aplicación tecnológica. Y fue precisamente cuando se alcanzó un cierto grado de desarrollo en los materiales que funcionarían como barreras semipermeables que se pudo considerar su cabal aplicación.

A continuación listaremos las principales ventajas y desventajas de la ósmosis inversa como técnica para tratamiento de agua.

Ventajas

- Permite remover la mayoría de los sólidos (inorgánicos u orgánicos) disueltos en agua (hasta un 99%). Asimismo, remueve los materiales suspendidos residuales y microorganismos.
- Realiza el proceso de purificación en una sola etapa y en forma continua.
- Es una tecnología extremadamente simple. Si bien la fabricación de las membranas no lo es, hay empresas especializadas que las han proveído por décadas.
- El proceso se realiza sin cambio de fase, con el consiguiente ahorro de energía (aunque el consumo energético del proceso como tal no es pequeño).
- Es modular y necesita poco espacio, lo que le confiere una versatilidad excepcional en cuanto al tamaño de las plantas.

Desventajas

- Es un proceso muy costoso (de 2 a 3 veces el costo de un proceso convencional de potabilización de agua, pero aún así es el proceso de desalación más económico), tanto por la especificidad de sus componentes, como por sus requerimientos energéticos en la operación, así como sus costos de mantenimiento.
- Se requiere personal capacitado que conozca las características de los componentes para evitar problemas operativos y garantizar un mantenimiento adecuado.
- No se fabrican en México las membranas, y aunque existen aquí empresas que venden los equipos, no dejan de ser intermediarios entre las grandes compañías (Dupont, Filmtec, Fluid Systems) y el cliente.

El presente trabajo de tesis se aboca a la obtención de agua potable con fines de suministro para consumo humano. Y es quizás en ese sentido que la técnica descrita no ha sido ampliamente utilizada. Innumerables industrias la utilizan en el pretratamiento o postratamiento de sus efluentes, pero su utilización como fuente de agua potable es hasta nuestros días precaria.

Las fuentes alternativas propuestas para las ciudades en estudio son, desde luego, las aguas oceánicas, que pueden considerarse una fuente inagotable; y las aguas salobres, es decir cuerpos acuíferos contaminados por infiltración de agua del mar. Las concentraciones salinas de ambas difieren grandemente, mientras que un agua salobre típica tiene alrededor de 1 500 mg/l de sales disueltas en ella, el agua de mar llega a tener 36 000 mg/l. La diferencia abismal en cuanto a la aplicación de la ósmosis inversa se observa más claramente al comparar sus respectivas presiones osmóticas. Para el agua salobre es cercana a las 103.4 kPa (15 psi), y para la marina es del orden de 2757.9 kPa (400 psi). Como se explicó anteriormente, la presión aplicada al influente debe superar esta presión osmótica, por lo que la diferencia entre ambos tipos de influente implica una muy significativa diferencia en la energía necesaria para clarificarlo. La productividad de una planta de ósmosis inversa es proporcional a la presión neta; ésta es igual a la presión de trabajo menos la presión osmótica. Esto quiere decir que la calidad alcanzable del agua producto es independiente de la concentración de sales del influente, pero entre mayor sea ésta, mayores serán los requerimientos energéticos para alcanzar un cierto grado de clarificación.

Tabla II.1. Porcentaje de rechazo a distintos contaminantes por medio de ósmosis inversa.

Inorgánicos					
Cationes			Aniones		
Nombre	Símbolo	% de rechazo	Nombre	Símbolo	% de rechazo
Sodio	Na ⁺	94-96	Cloruro	Cl ⁻	94-95
Calcio	Ca ⁺⁺	96-98	Bicarbonato	HCO ₃ ⁻	95-96
Magnesio	Mg ⁺⁺	96-98	Sulfato	SO ₄ ⁻	99*
Potasio	K ⁺	94-96	Nitrato	NO ₃ ⁻	93-96
Hierro	Fe ⁺⁺	98-99	Fluoruro	F ⁻	94-96
Manganeso	Mn ⁺⁺	98-99	Silicato	SiO ₂ ⁻	95-97
Aluminio	Al ⁺⁺⁺	99*	Fosfato	PO ₄ ⁻	99
Amonio	NH ⁺	88-95	Bromuro	Br ⁻	94-96
Cobre	Cu ⁺⁺	96-99	Borato	B4O ₇ ⁻	35-70*
Niquel	Ni ⁺⁺	97-99	Cromato	CrO ₄ ⁻	90-98
Estroncio	Sr ⁺⁺	96-99	Cianuro	CN ⁻	90-95
Cadmio	Cd ⁺⁺	95-98	Sulfito	SO ₃ ⁻	98-99
Plata	Ag ⁺	94-96	Tiosulfato	S ₂ O ₃ ⁻	99*
Arsénico	As ⁺⁺⁺	90-95	Ferrocianuro	Fe(CN) ₆ ⁻	99*
Orgánicos					
Nombre		Peso molecular	% rechazo		
Sucrosa		342	100		
Lactosa		360	100		
Proteínas		Mayor a 10 000	100		
Glucosa		198	99.9		
Fenol		94	93-99*		
Ácido acético		60	65-70		
Tinturas		400 a 900	100		
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)		-	90-99		
Demanda química de oxígeno (COD)		-	80-95		
Urea		60	40-60		
Bacterias y virus		5 000 a 100 000	100		
Pirógenos		1 000 a 5 000	100		
* Depende del pH					

Elementos que intervienen en el proceso

Es evidente que el elemento central en un proceso de ósmosis inversa son las membranas semipermeables que retienen las sales y elementos inorgánicos en general disueltos en el agua, y dejan pasar a través de sus minúsculos poros sólo a las

moléculas del líquido. Los contaminantes orgánicos son también retenidos, pero éstos pueden erradicarse por métodos convencionales.

Por tanto, el desarrollo de la tecnología descrita en esta sección, va necesariamente de la mano con el desarrollo de las membranas utilizadas. Reid y Breton llevaron a cabo experimentos que indicaron que diferentes materiales que pueden formar películas, presentan permeabilidad a las sales de las aguas salobres y de mar, pero el acetato de celulosa resultó ser el material más adecuado basándose en velocidad de producción de agua (WEBER, Walter, *Control de la calidad del agua. Procesos fisicoquímicos*, 1979).

Fue Loeb en 1962 quien desarrolló una técnica de preparación de películas para una membrana de acetato de celulosa modificado, con la cual se incrementó extraordinariamente el flujo por unidad de superficie manteniéndose un rechazo excelente.

La membrana de acetato de celulosa modificado, preparada según el proceso Loeb - Sourirajan, tiene una estructura asimétrica que consiste en un revestimiento denso y delgado sobre un soporte poroso. Una membrana típica tiene aproximadamente 100 μ de espesor y un revestimiento superficial de 0.2 μ , el cual constituye la superficie de rechazo. El resto de la película es esponjosa y porosa y contiene aproximadamente dos tercios de agua en peso. Generalmente la membrana debe mantenerse húmeda en todo momento.

Existen distintos arreglos de colocación de las membranas dentro de los contenedores presurizados. El más utilizado en un principio fue el llamado *de fibra hueca*, dados los buenos resultados obtenidos. Con el paso del tiempo se concibió el módulo de enrollamiento en espiral, que fue suplantando poco a poco al anteriormente mencionado. La experiencia en miles de plantas de ósmosis inversa ha demostrado que la membrana de tipo espiral tolera aguas con mucha más materia coloidal y sales incrustantes que el tipo de fibra hueca. La pionera en la fabricación de membranas de fibra hueca es la prestigiada firma Dupont, que ahora recomienda en lugar de aquellas, sus nuevas membranas de tipo espiral para cualquier agua considerada "difícil de tratar". La razón es que las membranas de tipo espiral pueden trabajar a flujos de

alimentación por elemento hasta tres veces más altos que las de fibra hueca. Estos flujos se traducen en velocidades tan altas y turbulentas que logran barrer gran parte de la materia coloidal. La fibra hueca delgada no puede trabajar a este régimen de flujo, ya que a altas velocidades los flujos turbulentos rompen las delicadas fibras huecas que son de diámetros aproximadamente capilares.



Figura II.1. Arreglo en espiral

Las placas lisas son usualmente colocadas "espalda con espalda" separadas por una pantalla a través de la cual el agua producto puede fluir. El arreglo de dos membranas y una pantalla está herméticamente cerrado en tres lados y ligado en el cuarto a un tubo que conecta el agua producto. Un espaciador en el lado de la alimentación es adicionado y el montaje total es envuelto o enrollado apretadamente alrededor del tubo colector. El agua de alimentación es paralela al tubo central mientras que el permeato fluye a través de la membrana hacia el tubo del centro.

Los módulos de enrollamiento espiral se insertan dentro de un recipiente cilíndrico de presión. Estos recipientes de presión en los que se instalan los elementos de ósmosis inversa deben ser de fibra de vidrio. Antiguamente se montaban en tubos de acero recubiertos con pintura epóxica, pero la experiencia demuestra que a mediano plazo, estos recipientes presentan problemas de corrosión y de mantenimiento. Así, la inmensa mayoría de las plantas de ósmosis inversa en la actualidad utiliza tubos de plástico reforzados con fibra de vidrio para contener las membranas a presión.

El papel del pH

La composición de las membranas de acetato de celulosa requieren un pH de entre 5 y 6 en todo momento durante su vida útil, incluyendo operación, paros y almacenaje; de lo contrario, la membrana se hidroliza. La hidrólisis es una reacción química que revierte el acetato de celulosa en simplemente celulosa, que es igual a papel. No bajar el pH de alimentación al intervalo mencionado inyectando ácido con una bomba dosificadora, ocasionaría que la membrana se convirtiera en papel mojado. Debido a que la membrana es un éster orgánico, su velocidad de hidrólisis es principalmente una función de la temperatura y el pH, como se observa en la figura anexa.

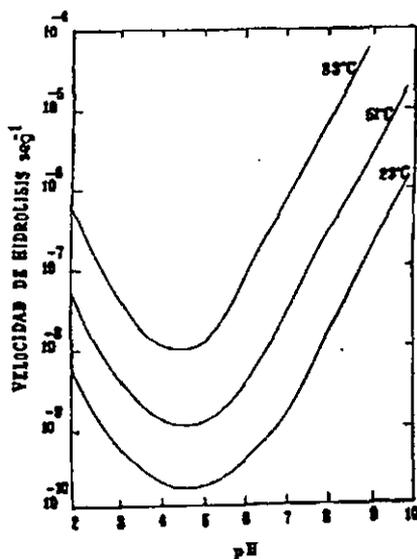


Figura II.2

Al aumentar la temperatura, la velocidad de hidrólisis aumenta; esta velocidad pasa por un mínimo a un pH alrededor de 4 a 5. Si queremos que las membranas duren muchos años, se debe trabajar en un pH comprendido entre 3 y 7.

A un pH correcto de 5.5, las membranas de acetato de celulosa pueden durar 80000 horas o más. A un pH mayor o menor la reducción de la vida útil es exponencial. Por ejemplo, la vida útil se reduciría en 90% a pH de 3.5 o 7.5, a 3 días a pH de 1.5 o 9.5 y así sucesivamente.

Las membranas de poliamida no requieren control de pH; sin embargo, para poder operar a alta recuperación y evitar incrustaciones de carbonato de calcio como ocurre en algunos casos, es recomendable dosificar una cantidad relativamente pequeña de ácido. La cantidad varía con el tipo de agua, pero un pH alrededor de 6.5 es satisfactorio.

Las membranas de poliamida tipo espiral se recomiendan para aguas que por sus impurezas puedan considerarse difíciles de tratar, ya que las membranas se pueden limpiar en condiciones extremas de pH y temperatura. Logran un rechazo de sales que es varias veces el de las membranas de acetato o las de fibra hueca delgada. Aunque su costo inicial puede ser un poco más alto que el de las membranas de acetato, las de poliamida tipo espiral resisten más abuso operacional y no son susceptibles a daños por cambios de pH, por lo que normalmente a largo plazo resultan más económicas.

En muchas instalaciones, la ósmosis inversa se considera un tratamiento terciario, posterior a distintos procesos de filtración y desinfección. Los pasos precedentes se hacen necesarios dada la delicadeza de las membranas que intervienen en la OI, susceptibles a incrustaciones y daños de diversos tipos.

Elementos presurizadores

La bomba que se instala frecuentemente para dar presión en las unidades de ósmosis inversa es la bomba centrífuga de tipo turbina. En esta bomba, el impulsor está rodeado por una serie de álabes directores que, por su convergencia, proporcionan canales que gradualmente se cierran, recorriéndolos el agua para después entrar al impulsor. En estos conductos el agua pierde velocidad y aumenta su presión. La bomba, que lleva un anillo difusor como son denominados los álabes y las aberturas dentro de los mismos, se asemeja mucho a una turbina.

Como el objetivo principal buscado en el diseño de la bomba es aumentar la presión en el líquido de alimentación a las membranas, se utilizan bombas centrífugas *multipasos* o de alta presión. En una bomba de un solo paso, se utiliza un solo impulsor para generar la presión necesaria que produzca la descarga requerida. Para dar alta presión no es económico utilizar un solo impulsor, ya que debe utilizarse una muy alta

velocidad de rotación o bien un impulsor de diámetro grande y en cada caso se producen altos esfuerzos mecánicos y se obtienen bajas eficiencias debido a la fricción de los discos y pérdida por fugas. Debido al espacio libre necesario entre el impulsor y la cámara circundante, el agua que ha pasado por el impulsor puede escurrir en una cantidad limitada de regreso hacia el lado de la succión disminuyendo así la eficiencia de la bomba. Este efecto se conoce como pérdida por fugas. Con cargas muy altas, esta pérdida tiene un valor de importancia debido a la gran diferencia que hay entre el lado de la descarga y el lado de succión del impulsor.

Por ello, en las bombas de alta presión (multipasos) se usan dos o más impulsores colocados en serie de tal manera que la descarga del primero se conecta a la succión del segundo, la descarga del segundo a la succión del tercero, y así sucesivamente. La cantidad bombeada es el gasto que pasa por cada impulsor, pero la carga total de presión generada es la suma de las cargas de presión desarrolladas por cada impulsor de la serie. Los diversos impulsores y sus pasos de conexión están alojados en una sola cámara.

Corolario

La gran ventaja de la ósmosis inversa sobre las otras tecnologías como el intercambio iónico y electrodiálisis, es que a un costo prácticamente constante puede remover hasta 99.99% de las sales del influente, sin importar que el agua sea totalmente salada; además, remueve el 100% de todos los virus y bacterias que se encuentran en la alimentación.

II.1.2 Destilación solar

La naturaleza, a través del ciclo hidrológico, nos provee continuamente de agua dulce. El agua oceánica, así como la contenida en otros cuerpos de agua, se evapora, se acumula en forma de vapor en las nubes, para luego condensarse y caer nuevamente a la tierra en forma de lluvia o nieve.

Los procesos de destilación de agua salina funcionan de la misma manera. Alrededor del 60% del agua artificialmente desalada en todo el mundo es producida al calentar agua salada para producir vapor que es posteriormente condensado para obtener así agua dulce.

El grueso de los costos de desalación por este proceso se generan a partir de la energía utilizada en la evaporación del agua. Por este motivo, uno de los fines de la destilación debe ser el recuperar y reusar una parte del calor consumido para disminuir los costos energéticos.

Dependiendo del tipo de planta de que se trate, los procesos de destilación generan, a partir de agua marina, agua con concentraciones de entre 5 y 50 ppm de sólidos disueltos totales (*Total Dissolved Solids*, TDS). El porcentaje del agua que entra al proceso que es recuperada como agua dulce oscila entre el 25 y el 50%.

Destilación solar

Los esfuerzos precursores en materia de destilación solar en México se encuentran en una planta experimental en Puerto Peñasco, Sonora. Ya en 1964 entró en funciones una planta algo más seria. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) instala dos plantas desaladoras con una capacidad de producción de 28400 m³/día, aprovechando las instalaciones de la termoeléctrica en dicha comunidad.

En los años setenta había diversas plantas en funcionamiento, casi todas con volúmenes de producción del orden de decenas de litros diarios, principalmente en el estado de Baja California Sur. A principios de los ochenta se distinguen las plantas de Bahía de Tortugas (BCS, 200 m³/día), Pichilingue (BCS, 1000 m³/día) y Cozumel (QR, 1000 m³/día).

Una de las razones fundamentales para construir plantas de desalación solar, al menos a pequeña escala, en nuestro país, es la "inequidad" en la distribución del recurso a lo largo y ancho de todo el territorio. El sureste del país tiene el 8% de la población total y el 40% del agua disponible; en contraste, en el altiplano y la mesa del norte habita el 60% de la población y sólo se cuenta con 12% del recurso.

Las aplicaciones más inmediatas de la desalación en México se muestran a continuación.

- a) Para el consumo doméstico en comunidades que carezcan del vital elemento o para complementar el gasto en alguna fuente existente, como es el caso en los estados de Baja California Norte, Baja California Sur, Coahuila, Durango, Zacatecas, Nuevo León, Tamaulipas y Quintana Roo.
- b) Para el fomento turístico, mediante el suministro a hoteles, centros recreativos, instalaciones para yatismo, etc., como en los casos de Cozumel, La Paz e Isla Mujeres.
- c) Para el desarrollo pesquero en las empacadoras de zonas costeras, como es el caso de varias comunidades del estado de Baja California Sur, Bahía de Tortugas y Punta Eugenia.
- d) Para el desarrollo industrial, sobre todo en la explotación de los recursos renovables, como lo hace Petróleos Mexicanos en desiertos y plataformas marinas.
- e) Usos específicos en las industrias química y alimenticia.
- f) Mejorar la calidad de agua de consumo humano contaminada por elementos tóxicos como el arsénico y el flúor en la Región Lagunera (Coahuila y Durango).
- g) Producción de agua ultrapura para uso de calderas en la industria.
- h) Industria hielera para la elaboración de cubos.

Existen algunas características comunes entre las comunidades en las que puede recomendarse la destilación solar como fuente alterna de consecución de agua potable, entre las que pueden señalarse:

- Están localizadas en zonas desérticas, lo cual provoca que su precipitación pluvial sea mínima.
- Sus mantos subterráneos presentan una renovación lenta y se les llega a considerar no renovables.
- En ocasiones estos mantos son de dimensiones reducidas, impidiendo el almacenamiento de agua.
- La topografía es accidentada provocando que el agua se pierda.
- Zonas escasas en agua dulce, pero abundantes en agua salada.

Uno de los problemas que enfrenta la destilación es que la atmósfera terrestre vicia grandemente la luz proveniente del Sol. Mientras que en la estratósfera el valor medio de la potencia suministrada por la radiación solar es de unos 1350 W/m^2 , en la superficie terrestre se observa un máximo que fluctúa entre 800 y 1200 W/m^2 , según el lugar, las condiciones atmosféricas y la época del año. Es importante señalar que la única radiación susceptible de ser concentrada es la radiación directa (no así la difusa). Sin embargo, un colector de placa plana aprovecha ambas.

La importancia ecológica del aprovechamiento de la energía solar es más que evidente. La energía proveniente del Sol que llega a la Tierra en un día es aproximadamente 100 000 veces la energía eléctrica generada diariamente por todos los métodos existentes. Es por ello que la implementación tecnológica para su aprovechamiento ha tomado un auge importante en las últimas décadas, y crecerá de manera exponencial de cara al cambio de siglo.

En 1985 la capacidad mundial instalada de plantas de desalación operando en tierra y excediendo producciones de 100 000 l/día fue mayor a los 11 billones de litros diarios (más de tres veces mayor que 10 años antes).

A las fuentes de agua de mar y salobre (aproximadamente 1000 a 10 000 mg SDT/l) se les asocia casi la totalidad de esta capacidad instalada (aproximadamente el 75% al agua de mar y 23% las fuentes de aguas salobres). Los procesos de membrana

representan alrededor del 30% de esta capacidad total y casi toda la capacidad de tratamiento de agua salobre.

Tabla II.2. Concentración de los principales elementos químicos contenidos en el agua de mar y su comparación con los valores permisibles en la Norma Oficial Mexicana.

Elemento contaminante	Concentración (ppm)	NOM (ppm)	Producción probable (T/año)
Cloruro	19 361	0.2 1.0	53 959 107
Sodio	10 768		30 010 416
Magnesio	1 298	125	3 617 526
Sulfuros	880	250	2 452 560
Calcio	408	300	1 137 096
Potasio	388		1 081 356
Bromuro	66		183 942
Carbón	28		78 036
Boro	6		12 828
Silicón	0		11 148
Fluoruros	1.3	1.5	3 623
Nitrógeno	1.0	0.1	2 787
Aluminio	1.0	0.2	2 787
Tritio	0.1		279
Fósforo	0.07		195
Bario	0.05	1.0	139
Arsénico	0.02	0.05	56
Manganeso	0.01	0.15	28
Zinc	0.009	5.0	25
Selenio	0.004	0.05	11
Uranio	0.002		5.6
Cromo	0.001	0.05	2.8
Titanio	0.001		2.8
Molibdeno	0.0005		1.4
Talio	0.0005		1.4
Torio	0.0005		1.4
Cadmio	0.0003	0.005	0.8
Lantánido	0.0003		0.8
Plata	0.0003		0.8
Vanadio	0.0003		0.8
Itrio	0.0003		0.8
Antimonio	0.0002		0.6
Cobalto	0.0001		0.3
Mercurio	0.00003	0.001	0.08

Diseño

La unidad de destilación básica se denomina alambique. Los alambiques solares son aparatos que, empleando la energía solar, transforman el agua contaminada o salobre en agua potable.

La operación de todos los destiladores solares está basada en las mismas consideraciones teóricas, así que los diseños reales sólo se diferencian geométricamente en la forma de soportar la cubierta; en cómo se alimenta el agua salada; en cómo se realizan las descargas del destilador y la salmuera y en los materiales de construcción.

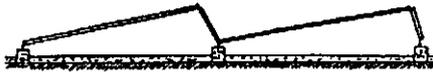
A continuación se anexa una figura que muestra las principales formas de distintos tipos de destilador solar.



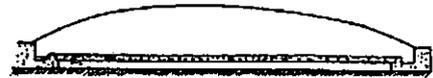
PAÑALES DE VIDRIO CONTINUO SOBRE UN RECIPIENTE



TECHO DE VIDRIO A DOS AGUAS



TECHO "DIENTE DE SIERRA"



TECHO DE PLASTICO INFLADO (abandonado)



TECHO DE PLASTICO DESINFLADO (abandonado)

Figura 1.3. Tipos de destiladores solares

A continuación se delinear algunos de los criterios que deben seguirse en el diseño de las unidades básicas de destilación solar, que en su conjunto eventualmente podrán llegar a conformar una planta de desalación de dimensiones importantes.

El dispositivo seleccionado debe satisfacer los requisitos siguientes:

- Un mínimo de atención requerida para fines de operación y mantenimiento.
- Costo inicial mínimo, lo que se traduce en que la producción de agua potable por unidad de superficie de captación solar sea máxima.
- Captar radiación solar sin sistemas de enfoque, esto es, emplear captadores planos.

Los requisitos anteriores se satisfacen empleando destiladores de etapas múltiples, es decir, sistemas de destilación en los que se utilice varias veces el calor captado de la radiación solar.

Por otra parte, el dispositivo seleccionado debe tener un mínimo de partes móviles en el sistema; el empleo de energía no solar debe ser mínimo, y su fabricación debe ser con partes de origen local.

Estas características se cumplen mediante el empleo de un dispositivo que utiliza un sistema de captación de energía solar muy similar a los convencionales, integrado por un tanque de almacenamiento térmico que retenga la energía captada por el Sol; un conjunto de captadores solares operando todo el año en una posición fija; y un sistema de circulación del agua de arranque y paro de acuerdo con las necesidades del sistema de destilación, con un mínimo de complejidad en las acciones de arranque/paro del equipo.

En el conjunto anterior, denominado *subsistema de aportación de energía*, cederá calor al destilador solar el tiempo que sea requerido, empleando para ello un mínimo de equipo de control, equipamiento y recursos en general.

El diseño óptimo se alcanza mediante la combinación de los subsistemas electromecánicos que se mencionan a continuación:

- Una sola bomba que circule el agua a través del campo de colectores y del cambiador de calor, el cual alimenta energéticamente al destilador. Cuando no hubiese suficiente energía solar incidente, o en las noches, la bomba sólo proporciona calor del almacenamiento térmico al destilador, sin circular el agua por los captadores solares.
- Un sistema independiente del anterior que circule el agua de mar a través de un cambiador de calor, para recoger la energía del subsistema de aportación y llevarlo al destilador solar. Es siempre preferible operar el sistema cuando el nivel de energía térmica del almacén sea suficiente para proporcionar la destilación de diseño, y no dejar de operar el destilador durante la noche, ya que producirá agua continuamente si bien no siempre dentro de las condiciones óptimas.

El proceso descrito puede tener los siguientes equipos de bombeo: uno para el subsistema de captación de energía solar, y otro que tome el agua de mar para enviarla al destilador, la circule en el cambiador de calor y la regrese a mayor temperatura al propio destilador.

Debido a las consideraciones hechas, ambas bombas operarían día y noche, y el único requisito de control sería una válvula selectora de paso para que el agua del primer subsistema (el solar), circule a través del cambiador de calor correspondiente ininterrumpidamente, y pase por los captadores solares únicamente cuando la radiación solar disponible así lo justificase.

Así, el equipo de destilación estará formado por un sistema de calefacción solar que debe acumular suficiente calor en su tanque térmico para mantener funcionando las 24 horas del día al dispositivo de desalación. Ese "subsistema" sería sumamente parecido a un calentador solar convencional, aunque dispondría de una extracción de energía útil constantemente a lo largo de todo el día, y por otro lado, un destilador solar, calentado mediante el subsistema solar que ya se comentó para operar en forma continua, con un suministro de energía constante.

Así, partiendo de la base de que el destilador solar está instalado en un contenedor que permite un mínimo de fugas de calor (sistema tipo adiabático), y por lo tanto

independiente de las características ambientales, el equipo en conjunto es susceptible de análisis en dos subsistemas independientes: el de captación y el de almacenamiento.

La diferencia fundamental entre estudiar un calentador del tipo empleado en destiladores solares y los calentadores domésticos convencionales, es que para los primeros la carga térmica útil es constante todo el día dadas las necesidades del destilador. Así, para hacer la mejor simulación del comportamiento del subsistema de captación de energía, es necesario saber de antemano los requerimientos térmicos.

El destilador en sí es una pila de charolas dentro de un recipiente o contenedor que debe permitir un mínimo de fugas de calor al exterior. La charola más baja es la que recibe la calefacción externa mediante un cambiador de calor que se alimenta del agua caliente del tanque térmico. La charola superior rechaza el calor al ambiente mediante la circulación continua de agua de enfriamiento (que podría ser agua de mar) haciendo uso de ventiladores que se encargan de realizar dicha labor. De esta forma, entre dos charolas contiguas, la de abajo estará más caliente que la de arriba, y evaporará hacia ella escurriendo el agua condensada por la parte de abajo, hasta unas canaletas que se encuentran en los lados, por medio de las cuales se capta el producto absorbiéndose el calor de destilación para reusarlo.

El conjunto de aparatos así dispuestos representa un problema de optimización. Desde el punto de vista del subsistema de captación de energía solar se desearía operar a bajas temperaturas, con el fin de obtener eficiencias elevadas. Por otro lado, desde el punto de vista del destilador, mientras mayor sea la diferencia de temperaturas entre las dos charolas extremas mayor será la producción de condensado en cada una, y mayor el número de charolas apiladas.

Consecuentemente, para una diferencia de temperaturas establecidas, hay un número óptimo de charolas con el cual se obtiene una producción máxima de condensado; sin embargo, dado que las temperaturas de las charolas extremas varían a lo largo del día, la selección del conjunto óptimo es función de las características cambiantes de la radiación solar y de las temperaturas ambientales.

II.1.3 Electrodialisis

Dentro de las técnicas que utilizan membranas para separar las sales del agua, pueden mencionarse como las más comúnmente utilizadas la electrodialisis y la ósmosis inversa.

La electrodialisis ha sido utilizada sobre todo para tratar agua salobre. Consiste en hacer pasar una corriente eléctrica por el agua para hacer pasar las sales a través de una membrana, dejando del otro lado de la misma el agua dulce.

La técnica aprovecha el hecho de que la mayoría de las sales están ionizadas (poseen una carga positiva o negativa), de manera que los iones son atraídos a electrodos con una carga eléctrica opuesta, a través de membranas que impiden el regreso de las sales. Así, el agua que queda del otro lado de la membrana va librándose paulatinamente de las sales disueltas en ella. Los sólidos suspendidos de diámetros mayores a los que pueden traspasar las membranas deben ser removidos en el pretratamiento del influente.

La teoría básica de las membranas de intercambio iónico permeaselectivas postula que la membrana contiene iones que pueden disociarse fácilmente, los cuales están enlazados débilmente a los grupos fijos de la carga opuesta. Si los grupos fijos son aniónicos y los iones móviles, o contraiones, son catiónicos, los cationes permearán preferentemente a través de la membrana cuando se aplique un campo eléctrico. Para grupos catiónicos fijos, los aniones móviles permearán a través de la membrana. Cuando una membrana de intercambio iónico permeaselectiva se equilibra con un electrólito, se establece un equilibrio llamado de Donnan (Walter y Weber, *Control de la calidad del agua*, cap. VI), en el caso de que la membrana sea al menos ligeramente permeable al solvente. En el equilibrio, existe una gran diferencia entre las concentraciones de cationes y aniones dentro de la membrana, si la concentración de iones fijos de la membrana es grande.

Una buena membrana de electrodialisis debe ser capaz de discriminar entre iones de carga opuesta, ha de tener un número de transporte bajo y una conductividad eléctrica buena. También debe tener buena resistencia química (principalmente a la oxidación), adecuada resistencia mecánica y estabilidad dimensional.

Tabla II.3. Propiedades típicas de algunas membranas de intercambio iónico convencionales.

Tipo	Fabricante	Permeaselectividad (* (+,-))	Resistencia por área de membrana (ohm-cm ²)	Resistencia húmeda (atm)	Espesor (mm, húmeda)
Estireno-DBV homogéneo base CK-1 CK-2	Asahi Chem Ind	(+) 0.85 (-) 0.92	0.14 – 0.16 0.13 – 0.156	2.0 – 2.4 1.9 – 2.3	– 0.228
Material reforzado CR-61 AR-111 ^a	Ionics	(+) 0.65 (-) 0.57	7.82 – 27.21 7.48 – 23.81	115 – 400 110 – 350	0.53 – 1.29 0.53 – 1.37

La permeaselectividad es la capacidad que tiene una membrana para dejar pasar o discriminar un ion según su carga.

Energía demandada en el proceso

El grado de purificación alcanzada depende directamente de la diferencia de potencial aplicada, mientras que la capacidad de establecer esta última depende de la concentración de agentes iónicos en el influente. De esta manera, el sistema óptimo es una combinación entre los requerimientos energéticos y el grado de remoción de contaminantes.

El consumo de potencia en función de la cantidad de sal separada puede calcularse a partir de las leyes de Faraday y Ohm. En la electrodiálisis, la ley de Faraday se emplea para determinar la relación entre flujo de corriente y la transferencia de electrólito a través de la membrana.

Equivalentes transferidos por unidad de tiempo:

$$N_d Q_d \Delta N_i^0 = \frac{\eta I N_d}{F}$$

en donde N_d es el número de compartimentos de flujo diluido, Q_d es el caudal a través de un compartimento de flujo diluido, I es la corriente, η es la eficacia de la corriente, N_i^0 es el número de equivalentes – gramo electroquímicos por unidad de volumen y F es la constante de Faraday. La capacidad de una instalación para desmineralización es proporcional a la corriente, número de pares de membranas y eficacia de la corriente. Según la ley de Ohm, la potencia necesaria viene dada por el producto del cuadrado de la intensidad, I , y la resistencia eléctrica del “paquete” (pila) de membranas, R_s :

$$\bar{P} = I^2 R_s = R_s \left[\frac{Q_d \Delta N_i^0 F}{\eta} \right]^2$$

La energía necesaria puede deducirse a partir de las ecuaciones anteriores. El consumo de energía por equivalente transferido viene dado por:

$$\bar{E} = \frac{P}{Q_d \Delta N_i^0} = \frac{I R_s F}{\eta N_d}$$

Esta última ecuación nos indica que la energía por equivalente de desmineralización unitario aumenta en proporción directa a la intensidad de corriente, mientras que la potencia lo hace con el cuadrado de dicha intensidad.

En los sistemas de electrodiálisis, la corriente necesaria sobrepasa los valores teóricos, debido a los siguientes factores:

1. Las membranas no son perfectamente selectivas.
2. En la pila se establecen pasos de corriente paralelos.
3. El agua puede ser transportada a través de la membrana.
4. El agua puede disociarse en H^+ y OH^- para densidades de corriente elevadas o concentraciones de sal bajas.

Así, la eficacia de la corriente viene dada por el producto de tres eficacias individuales:

$$\eta = (\eta)_e (\eta)_m (\eta)_w$$

El término $(\eta)_s$ considera que las membranas no son perfectamente selectivas. La pérdida de corriente a través del tubo de distribución viene representada por $(\eta)_m$. El término $(\eta)_w$ considera el transporte de agua a través de la membrana.

El voltaje que debemos suministrar está constituido por la suma de las diferencias de potencial asociadas con los electrodos, los potenciales de concentración a través de la membrana y las caídas de voltaje en las soluciones y membranas.

Los componentes principales de la resistencia de la pila de electrodiálisis son las resistencias de las masas principales de las soluciones, las capas límites de las membranas y las propias membranas.

Diseño

Una unidad electrodiализadora comercial contiene una serie alternada de membranas permeables catiónicas y aniónicas, y emplea flujo forzado para reducir la polarización por concentración. Un potencial eléctrico es aplicado a través de la membrana para proveer la fuerza mecánica que inducirá la migración de los iones. Las membranas catiónicas permiten sólo el paso de iones positivamente cargados, mientras que las membranas aniónicas sólo permiten el paso de los iones negativos.

Para densidades de corriente bajas, la selectividad es más pronunciada, puesto que la concentración de los iones en la membrana viene determinada por la carga. Para densidades de corriente altas, la concentración de un ion en la membrana viene controlada por la difusión, y las relaciones de concentración para los contraiones en la membrana se aproxima más a las que existen en la disolución.

Tabla II.4. Ablandamiento del agua durante la desmineralización del agua salobre

Especies	Concentración (ppm)		% que permanece
	Alimentación	Producto	
Sodio, Na ⁺	670	145	21.7
Calcio, Ca ²⁺	128	9	7.7
Magnesio, Mg ²⁺	26	1	6.0
Dureza total, CaCO ₃	385	24	6.2
Cloruro, Cl ⁻	1120	207	18.5
Sulfato, SO ₄ ²⁻	161	12	7.5
Bicarbonato, HCO ₃	66	22	33.0
Nitrato, NO ₃ ⁻	4	1	25.0
Fluoruro, F ⁻	1.84	0.88	47.8
SDT (suma)	2163	398	18.3

Aunque el contenido total de sólidos se reduzca por un factor de cinco, la dureza se reduce por un factor de quince. Un sistema de electrodiálisis promedio puede separar un influente conteniendo de 1 000 a 5 000 mg/l de sales inorgánicas, en dos efluentes: uno clarificado, con niveles que van de los 100 a los 500 mg/l y uno concentrado, en el que se alcanzan niveles salinos de 10 000 mg/l.

Muy a menudo, el diseño de un sistema de electrodiálisis implica la utilización de datos obtenidos en un sistema de laboratorio o planta piloto con diferentes intervalos de concentración, concentrado y producto.

En cuanto a la configuración de celda y pila, se distingue para ello un factor de diseño fundamental, que se refiere al régimen de flujo dentro del electrodiálizador. Si el régimen es turbulento, se recomienda un camino de flujo serpenteante largo, con el cual obtenemos un tiempo de permanencia prolongado para la solución. Para flujo laminar, se limitará el trayecto del fluido a la porción activa de la celda.

Existen diversos tipos de configuración en el diseño de una planta de electrodiálisis. Esas configuraciones se distinguen principalmente por la disposición de las unidades de electrodiálisis y el camino que seguirá el flujo dentro del proceso. Dentro de las configuraciones típicas se distinguen principalmente los métodos continuo (dentro de los cuales están las configuraciones multipilas, de varias etapas internas y de alimentación y purga) y discontinuo.

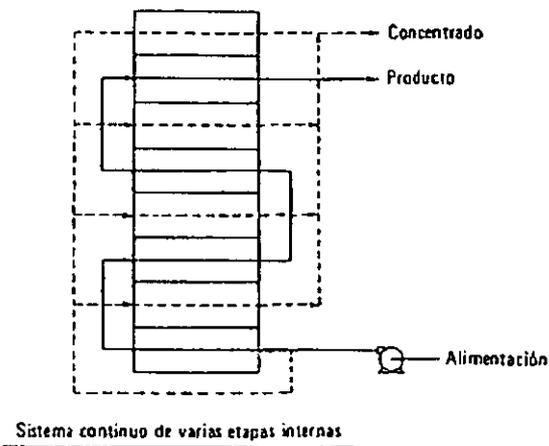
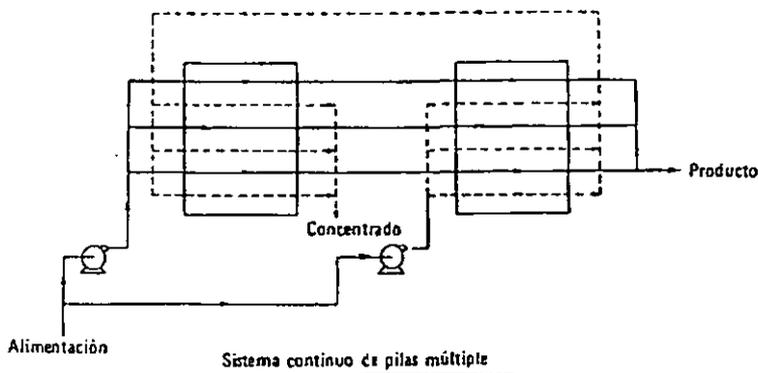
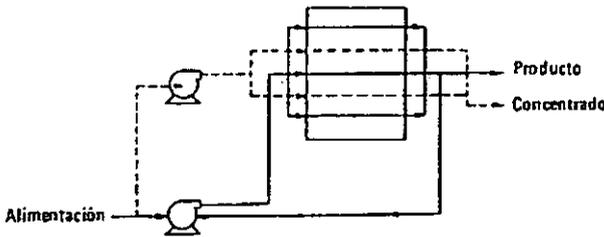


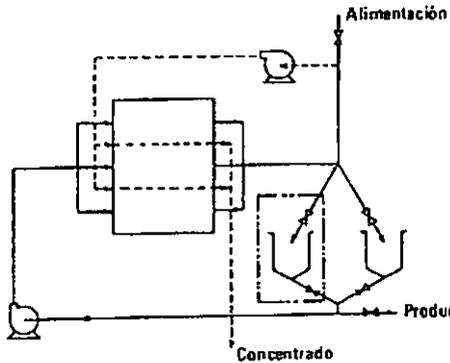
Figura II.4. Esquema de arreglo en multipilas

Las ventajas del arreglo en multipilas son la flexibilidad en el grado de desalinización, no hace falta presurización, un simple par de electrodos y un flujo continuo de producto. Sus desventajas son que la operación es sensible a la resistencia de membrana y caudal de alimentación, presión de trabajo alta y área de membrana grande para un caudal de producto determinado.

En cuanto a la configuración de alimentación y purga se tiene un caudal de producto y calidad constantes, mientras que la concentración de la alimentación es variable. Su ventaja principal es que la densidad de la corriente necesaria es baja, mientras que como desventajas presenta consumos de potencia grandes y recirculación.



Sistema continuo de alimentación y purga



Sistema de recirculación discontinua

Figura II.5. Esquemas de alimentación y purga y recirculación discontinua

En el arreglo de recirculación discontinuo se recicla una cantidad fija de la alimentación a través de la pila. Las variaciones en la resistencia de la membrana afectan al caudal, pero no a la calidad del agua producto. Como inconvenientes están la dificultad en evaluar el rendimiento (pues se trabaja de un estado no estacionario), consumos de potencia elevados y densidad de corriente variable.

En una unidad de electrodiálisis, generalmente es necesario tratar previamente la alimentación. El taponamiento de los caminos tortuosos finos se produce por la materia en suspensión, y ésta debe eliminarse por una filtración previa. Al igual que en el proceso de ósmosis inversa, el ensuciamiento de la membrana se atribuye principalmente a la materia coloidal y a la precipitación de sales poco solubles tales como carbonato cálcico, sulfato cálcico e hidróxido férrico. La mayor parte de los coloides presentes en las aguas naturales están cargados negativamente y se depositan sobre las membranas de intercambio aniónico. Si la cantidad de estas sustancias es pequeña, la situación puede controlarse por una limpieza periódica. Sin embargo, cuando se desmineralizan aguas residuales tales como efluentes de una planta de lodos activados, es necesario efectuar un pretratamiento con carbón activo o resinas de barrido. El tratamiento posterior comprende ajuste de pH, cloración del agua producto y tratamiento de la salmuera antes del vertido final.

Aplicaciones

La desalinización del agua salobre (<10 000 ppm) constituye la aplicación principal de este proceso. En todo el mundo se han construido muchas plantas actualmente en funcionamiento. Los costos de la electrodiálisis son directamente proporcionales, en primera aproximación, a la salinidad de la alimentación.

Otro campo de interés lo constituye la desmineralización del agua residual. Se ha investigado el proceso de electrodiálisis como un método para desnitrificar las aguas agrícolas de escurrimiento. Se llevan a cabo investigaciones para la desmineralización de los efluentes cloacales por este método.

Las industrias de alimentación y bebidas representan otra área activa de aplicación de la electrodiálisis. Se ha utilizado para desalar el suero de la leche, endulzar los jugos cítricos y aguas residuales de industrias de conservas de pescado.

En la industria química, la electrodiálisis se ha utilizado para recuperar muchos compuestos químicos diluidos en los residuos. Para citar unas pocas de las aplicaciones en esta industria tenemos: recuperación de ácidos carboxílicos (tales como ácido acético, cítrico y láctico), compuestos químicos de residuos papeleros (tales como productos de la lingina) y los cromatos en los residuos de la industria galvanoplástica.

La optimización económica de las plantas de electrodiálisis ha recibido mucha atención en los últimos tiempos. Se han presentado análisis de costos detallados de las variables de proceso, así como comparaciones de costos de desalación de la electrodiálisis con otros procesos.

Los factores de costo principales son: cargas fijas en concepto de recuperación de la inversión inicial de capital; sustitución de las membranas; consumo de potencia eléctrica; costos de operación de mano de obra, pretratamiento y limpieza. El primer factor es el más significativo.

II.2 Esfuerzos anteriores por desalar agua

Desalación en la Central Termoeléctrica de Rosarito

Rosarito, lugar en donde se localiza la Planta Termoeléctrica a la que se refiere esta sección, está ubicada 20 km al sur de la ciudad de Tijuana. Las instalaciones tienen una capacidad instalada de 30 MW. A través de un acuerdo con el municipio de Tijuana, la CFE se comprometió no sólo a proveer de energía eléctrica, sino también agua potable para los consumidores de la zona. La secuencia parecía lógica ya que de cualquier forma las calderas de alta presión de la Central necesitan de agua ultrapura.

La CFE instaló desde los años sesenta plantas de evaporación para proveer de agua a sus calderas y de agua potable a Tijuana. En aquél tiempo era justamente ésa la tecnología más moderna y probada en materia de desalación. Sin embargo, los grandes equipos de la planta sufren de incrustaciones en las superficies de transferencia de calor, además de los problemas de corrosión que, en conjunto, disminuyen su confiabilidad y disponibilidad en línea. La reparación de las evaporadoras es complicada y costosa, y este conjunto de factores hizo de la evaporación una tecnología poco competitiva para cubrir las necesidades de la CFE en Rosarito. A finales de los setenta la CFE decidió evaluar nuevas tecnologías factibles de ser aplicadas en Rosarito, resultando ser la Ósmosis Inversa la más prometedora para desalación de agua marina.

En 1981 la Comisión convocó a un concurso internacional para el diseño y construcción de la que en ese entonces sería la planta para desalar agua de mar más grande de México, con una producción de 700 m³ por día.

La planta consiste en cuatro módulos iguales de 175 m³ por día, cada uno de los cuales está equipado con una bomba Wheatley de alta presión para producir 5.7 l/s a una presión de 70 a 560 mca. Cada módulo consta de 10 permeadores B-10 en paralelo (fabricados por Dupont). El agua producto de estos módulos se envía a una segunda etapa dividida en tres módulos, la cual está equipada con membranas B-9. La calidad del agua del segundo paso es de aproximadamente 100-200 micromohs. Los

micromohs son unidades que representan una medida de la conductividad que presenta el agua, y a la vez una medida indirecta de la cantidad de sólidos disueltos totales (SDT) presentes en ella. Cuanto mayor sea la conductividad en el líquido, mayor será también la cantidad de SDT. Este producto se pasa por un pulidor antes de ser enviado a las calderas de alta presión.

Con el fin de adecuar el agua a la calidad que requieren los permeadores de fibra hueca delgada, se instalaron los siguientes procesos de pretratamiento:

1. Dosificación de cloro en la toma abierta para controlar vida marina.
2. Dosificación de sulfato férrico como coagulante
3. Dosificación de hipoclorito de calcio para oxidar el ion férrico.
4. Filtros multimedio cargados con arena sílica / antracita.
5. Dosificación con ácido a pH 6.5, ello convierte los carbonatos a bicarbonatos evitando así la incrustación de los primeros.
6. Dosificación de Hexametáfosfato de sodio 5-8 ppm (anti-incrustante).
7. Remoción de cloro con metabisulfito de sodio.
8. Esterilización con lámparas ultravioleta.
9. Filtros de cartucho de 5 micras.

Pese a este intenso pretratamiento, el agua de la toma de mar difícilmente cubre los requisitos de buena alimentación que requieren las membranas de fibra hueca delgada. Durante el invierno, las tormentas del Pacífico enturbian el agua; en el verano, la contaminación fecal proveniente del centro urbano del norte incrementa el contenido de materia orgánica y bacterias. En ocasiones, el índice de turbiedad (SDI) en el agua de la toma es superior a 50, siendo que las membranas de fibra hueca no toleran un SDI mayor a 3. Durante las épocas mencionadas la operación de los filtros multimedio por más de unas horas se hace en extremo complicada.

A pesar de lo antes mencionado, los operadores de la planta de ósmosis inversa de Rosarito han logrado con el tiempo dominar el pretratamiento y alcanzar una operación exitosa de la planta. Sin embargo, tan sólo el costo de los reactivos implica 30 centavos de dólar por metro cúbico producido. A esto hay que agregar el costo de los filtros de cartucho y de la mano de obra para efectuar y supervisar el pretratamiento.

Pese a la buena operación del personal de CFE, no se logró solucionar el problema del ensuciamiento extremo de los permeadores de fibra hueca B-10 de Dupont. Éstos tienen que ser limpiados con reactivos cada 6 u 8 semanas consumiendo la operación aproximadamente 18 horas. Como consecuencia, las membranas B-10 pierden su potencialidad para desalar agua cuando hay cambios de pH, cuando hay sales metálicas en el agua y cada vez que se lavan con detergentes alcalinos. Las membranas deben ser rejuvenecidas con ácido tánico (PTB), con el que recuperan su capacidad de rechazo de sales. Este proceso aumenta el costo y el tiempo de limpieza. Un grupo de ingenieros de la CFE evaluó en 1984 la operación de una planta desaladora al otro lado de la frontera, en Chula Vista, Ca. La diferencia medular con la de Rosarito era la fuente de abastecimiento, siendo ésta un pozo playero de unos 40 m de profundidad. El pozo tiene una capacidad probada de 60 l/s, y su costo completo fue de unos 200 000 dólares, es decir, aproximadamente la décima parte del costo anual del pretratamiento químico y filtración de Rosarito. El pozo de Chulavista está equipado con unos 20 metros de rejilla Johnson inoxidable, con el fin de obtener un agua clara con un SDI menor de 0.5 sin pretratamiento. En efecto, la playa y la rejilla Johnson constituyen el pretratamiento.

Tras la evaluación de 1984, se concluyó que la Planta de Rosarito podría simplificar enormemente la operación de la ósmosis inversa y reducir a la mitad los costos de producción al adaptar a sus necesidades algunos de los conceptos probados en Chula Vista. Así, la CFE perforó un pozo playero en la orilla del mar de 35 m de profundidad que provee de agua estéril para la ósmosis inversa, y cambió sus membranas al tipo espiral, lo que le permitió cuadruplicar el producto a un costo asequible.

La primera fase de conversión a membranas tipo espiral se terminó a mediados de agosto de 1985. En esta fase se remplazaron la mitad de los permeadores B-10 de Dupont. Se sustituyeron con cinco recipientes de presión, cada uno con seis elementos 2021 SS de *Fluid Systems*. La capacidad de esta fase es de más de 350 m³ diarios de producto, con calidad mayor a 500 micromohs. El producto de esta planta se envía a la planta de segunda etapa para obtener agua de 40 micromohs.

Desalación de agua salobre por ósmosis inversa en Mexicali

Ubicada en la región más árida y calurosa del país, Mexicali es una de las ciudades jóvenes con el mayor crecimiento de las últimas décadas. Ha tenido que enfrentar los grandes problemas que presenta el suministro de agua potable. Dicho suministro, con la oportunidad que requiere su creciente población, ha sido para la ciudad el más grande de los retos.

Las fuentes tradicionales han sido el Río Colorado, que por sus altos niveles de salinidad ha sido únicamente utilizado para servicios domésticos e industriales, y los pozos de Ocotillo, a 50 km de la frontera norte. Pero los problemas presentados por estas fuentes no son pocos: el abatimiento del acuífero de Ocotillo, los constantes aumentos en el costo del transporte y la fluctuante situación cambiaria de nuestra moneda. Encontrar nuevas alternativas para satisfacer la demanda de agua para consumo humano es prácticamente una obligación.

Tratar el agua del Río Colorado por métodos convencionales, como lo son el uso de suavizadores e intercambio iónico, resulta en costos que los deja fuera de mercado, además de que ni siquiera se alcanza el nivel de tratamiento adecuado.

En 1978, a partir de las investigaciones auspiciadas y llevadas a cabo por la OWRT norteamericana y la DIGASES en México, la ósmosis inversa surge como una alternativa rentable para Mexicali, tomando en cuenta los avances tecnológicos en tal sentido y las experiencias comerciales en otros países. Estimulada por los esfuerzos pioneros en Mexicali, nació la empresa Purificación Integral en el Tratamiento de Agua (PITA, S.A.) con el objetivo de abastecer la demanda de agua para consumo humano.

Los ingenieros de la empresa estudiaron las dos configuraciones comerciales de membranas de ósmosis inversa: fibra hueca y tipo espiral. Tomando en consideración que el agua cruda tiene altos niveles de fino sedimento coloidal y otros materiales en suspensión, fueron seleccionadas las membranas de tipo espiral, pues presentan menores índices de taponamiento por los sólidos finos contenidos en el agua, facilitando su eliminación mediante simples lavados en caso que esto ocurra.

Atendiendo a que las nuevas membranas fabricadas con poliamida, a pesar de permitir un mayor nivel de producción de agua, son susceptibles al cloro presente en el líquido

de la ciudad que fluctúa entre 0.5 y 1.5 mg/l, PITA, S.A. decidió usar membranas de acetato de celulosa (ROGA de *Fluid Systems*), que toleran en promedio cloro concentrado hasta 1 mg/l aceptando concentraciones superiores ocasionales.

La experiencia de la empresa en el proceso de ósmosis inversa ha sido excelente. Durante los primeros meses de operación las sales removidas se detectaron en más del 90%, ocasionando que el agua producto fuese incluso insípida para el paladar del consumidor de Mexicali. Se resolvió mezclar el agua filtrada, sin pasar por membranas, con la del producto de la ósmosis inversa hasta alcanzar un sabor agradable. PITA, S.A. satisfizo en los años ochenta 30% de la demanda de Mexicali, produciendo agua de buena calidad y sabor, a costos razonables.

De acuerdo al diagrama siguiente, la planta consta de:

1. Toma de la red municipal, tubería de 2'' de diámetro.
2. Bomba de ayuda.
3. Filtro de arena de 36'' de diámetro.
4. Bomba de inyección de ácido sulfúrico.
5. Bomba de inyección de hexametáfosfato de sodio.
6. Filtro de cartucho de 20 micrones.
7. Bomba de alta presión Goulds MB 4560 - 55.
8. Nueve tubos de presión.
9. 54 Membranas ROGA 41605.
10. Descarbonador (para remover CO₂).
11. Estabilizador de pH.
12. Tanque de almacenamiento.
13. Filtro de carbón activado de 36'' de diámetro.
14. Bomba de transferencia.

Otros sistemas en funcionamiento

Se optó por hacer la descripción detallada de las plantas de Rosarito y Mexicali por ser las más representativas de las condiciones geográficas de la zona en estudio. A continuación se listan otros sistemas en funcionamiento en nuestro país (Fuente: INOVA, S.A.).

1. CFE. Planta del Mezquital, Monterrey, N.L.

Desalación de agua salobre de pozo.

Produce 1500 m³/día con membranas *Fluid Systems* (FS) de acetato de celulosa.

2. CFE. Planta Río Bravo, Tamaulipas.

Desalación de agua salobre de río.

Produce 1680 m³/día con membranas FS de película delgada compuesta.

3. Hielera "La Sultana" en Pesquería, Nuevo León.

Desalación de agua de pozo.

Produce 60 m³/día con membranas FS de película delgada compuesta.

4. Conductores Monterrey, en Monterrey, N.L.

Desalación de agua salobre de la red municipal.

Produce 7.5 m³/día con membranas FS de película delgada compuesta.

5. Ensambladora, *General Motors* de Ramos Arizpe.

Desalación de agua salobre de pozo.

Produce 3000 m³/día con membranas AJAX de acetato de celulosa.

6. Motores, *General Motors* de Ramos Arizpe.

Desalación de agua salobre de pozo.

Produce 1800 m³/día. Esta planta fue convertida de membranas de fibra hueca al tipo espiral de acetato de celulosa, y posteriormente a película delgada compuesta en espiral.

7. Química del Rey en Laguna del Rey, Coahuila.

Desalación de agua salobre de pozo.

Produce 500 m³/día con membranas DuPont de poliamida posteriormente cambiadas a espirales de película delgada compuesta.

8. Química del Rey, Laguna del Rey, Coahuila.

Desalación de agua salobre de pozo.

Produce 100 m³/día con membranas FS de película delgada compuesta de baja presión.

9. Coca-Cola, Campeche, Campeche.

Desalación de agua salobre de pozo.

Produce 454 m³/día con membranas FS de película delgada compuesta.

10. Coca-Cola, Cancún, Quintana Roo.

Desalación de agua salobre de pozo.

Produce 227 m³/día con membranas FS de película delgada compuesta.

11. Famosa, Ensenada, BCN.

Desalación de agua salobre de pozo.

Produce 625 m³/día con membranas FS de acetato de celulosa, cambiadas posteriormente a película delgada compuesta.

13. AHMSA, en Monclova, Coahuila.

Desalación de agua salobre de pozo.

Produce 815 m³/día. Cambió sus membranas de fibra hueca delgada al tipo de película delgada compuesta FS.

14. Sidermex - Hércules, Coahuila.

Desalación de agua salobre de pozo.

Produce 363 m³/día con membranas DuPont de poliamida (fibra hueca delgada), posteriormente cambiadas a espiral de película delgada compuesta.

15. CFE, Nachi-cocom, Mérida, Yucatán.

Desalación de agua salobre de pozo.

Produce 363 m³/día con membranas FS de película delgada compuesta.

16. CFE, Huinala, Nuevo León.

Desalación de agua salobre de pozo.

Produce 295 m³/día, membranas originales de fibra hueca delgada sustituidas por espiral de película delgada compuesta.

17. Industria del Álcali, S.A., Villa García, Nuevo León.

Desalación de agua salobre de pozo.

Produce 1250 m³/día con membranas de tipo espiral.

18. Exportadora de Sal, S.A., Guerrero Negro.

Desalación de agua de mar.

Produce 180 m³/día con membranas de tipo espiral.

Petróleos Mexicanos tiene más de una docena de plantas para desalar agua de mar en varias de sus plataformas marinas. También se tienen plantas desaladoras de agua de mar en las Islas Isabel en el Pacífico, entre otras.

El incremento de la demanda de agua potable de buena calidad en ciudades, puertos y poblaciones turísticas, las necesidades industriales, la necesidad de reusar las aguas y el control de la contaminación de los cuerpos receptores, son problemas que ahora pueden resolverse con ósmosis inversa, tecnología cuya extensión en México es un hecho irreversible.

II.3 Plantas modelo. La planta desaladora de Yuma.

Historia

El Río Colorado es la fuente principal de abastecimiento de agua potable de la zona suroeste del estado estadounidense de California, y la región fronteriza del estado de Baja California Norte. De él depende la consecución del recurso para cerca de quince millones de personas, y hacia finales de siglo la preocupación fundamental no es la cantidad de agua que puede extraerse del Río Colorado, sino la calidad por alcanzar.

La salinidad es un fenómeno de ocurrencia natural en cualquier río. Sin embargo, las distintas actividades realizadas en el entorno del Río Colorado (tales como los numerosos embalses y la irrigación) habían propiciado que para inicios de siglo, la salinidad natural del río se elevara desde su nivel natural (50 ppm) hasta cerca de 400 ppm. A mediados de los sesenta, en las inmediaciones de la presa Morelos (justo en la línea fronteriza) la salinidad había llegado a niveles cercanos a las 1200 ppm.

El 3 de febrero de 1944 nuestro país firmó un acuerdo con los Estados Unidos por medio del cual el país vecino se comprometía a suministrar a México 1850 millones de metros cúbicos de agua al año ($58.7 \text{ m}^3/\text{s}$), dada la explotación que estaban haciendo del Colorado, río internacional. Sin embargo, el tratado no incluía especificaciones acerca de la calidad del agua. El desacuerdo en este punto no fue expresado sino hasta 1961, señalando los problemas de crecimiento de las cosechas en el Valle de Mexicali. Después de más de 12 años de negociaciones, durante los cuales se alcanzaron numerosos acuerdos interinos, se alcanzó una solución permanente en 1973. México y Estados Unidos firmaron una enmienda al tratado de 1944, por la cual se especificaba que las aguas norteamericanas descargadas en la presa Morelos no excederían una salinidad de 115 (con una tolerancia de 30) ppm por encima de los niveles en la presa Imperial, 43 kilómetros aguas arriba.

El gobierno norteamericano alcanzaría en parte los niveles de salinidad acordados a través de la construcción de una planta para tratar las aguas salinas infiltradas desde las tierras agrícolas al este de Yuma. Así fue como en 1974 se inició la construcción de la Planta Desaladora de Yuma. De esta manera, su función principal es la de alcanzar los niveles de salinidad adecuados en la descarga de aguas del Río Colorado en la presa Morelos.

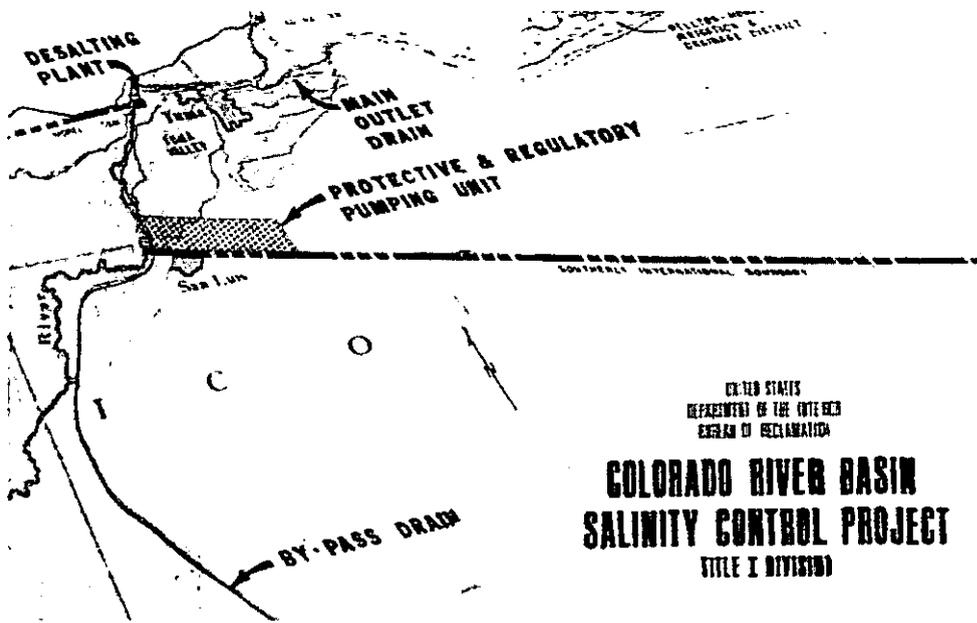


Figura 11.5. Localización de la planta

Descripción general del proceso

La desalación se lleva a cabo por medio de ósmosis inversa. En el proceso intervienen cerca de 9 000 elementos de membrana que se distribuyen dentro de los 1 700 contenedores presurizados de fibra de vidrio. La longitud de estos últimos es de 7 metros y sus diámetros varían entre 32 y 22 centímetros.

La separación de la sal del agua se lleva a cabo a través de la conjunción de procesos físicos y químicos. Tres cuartas partes del agua influente pasan a través de las membranas poliméricas (acetato de celulosa), para tal efecto se les aplica una presión de 2 500 kPa, que fuerza al agua hacia el conducto central del contenedor. El proceso aísla más del 90% de las sales disueltas originalmente, con lo que se logra abatir el nivel de salinidad desde las 3 000 ppm hasta menos de 300 ppm.

El agua desalada es posteriormente mezclada con el resto del agua, que no ha pasado por el proceso y por tanto tiene el contenido original de sales, para alcanzar el nivel de salinidad deseado. Este proceso de mezcla es el más adecuado para abatir los costos

del proceso, ya que la ósmosis inversa ofrece como producto agua con niveles de calidad superiores a los requeridos. La nueva mezcla es conducida a través de un canal de 360 m de longitud para ser descargada en el Río Colorado.

La salmuera que se genera como desecho en el proceso, con contenidos de sal cercanos a las 10 000 ppm, es impulsada hacia las turbinas recuperadoras de energía, en la planta de bombeo de agua clarificada. Posteriormente es conducida a la ciénaga de Santa Clara en el Golfo de Cortés. A este depósito final se conducen también las aguas provenientes de la actividad agraria de los alrededores de Yuma que no entran a la planta desaladora.

Descripción de la planta

La Planta Desaladora de Yuma está ubicada en una superficie de 24 hectáreas, unos 8 kilómetros al oeste de la población del mismo nombre. Es la planta de ósmosis inversa más grande en todo el mundo. Produce un gasto de $3.2\text{m}^3/\text{s}$ de agua desalada, a partir de un influente de $4.5\text{m}^3/\text{s}$ de agua salobre, que es la capacidad máxima de admisión de la planta. En caso de ser necesario, la capacidad de producción podría ampliarse a $4.2\text{m}^3/\text{s}$. Las aguas salobres procedentes de las tierras agrícolas al este de Yuma son conducidas a la planta a través de tuberías de concreto.

El influente pasa a través de un sistema de rejillas y mallas que remueven algas, ramas de árboles y cualquier otro objeto de medianas a grandes dimensiones. Asimismo se trata el agua a través de cloración. Antes de ser desalada, el agua debe pasar por meticulosos procesos de pretratamiento en los que se remuevan todos los sólidos que contenga. De no ser así, las delicadas membranas utilizadas en la ósmosis inversa se ocluirían de inmediato, haciéndolas inservibles. De esta manera, la vida útil de las membranas, que es de tres a cinco años, se vería limitada a tan sólo una hora. El proceso se detalla a continuación.

El primer paso del pretratamiento son los tanques desarenadores. En ellos la velocidad del flujo de agua es disminuida considerablemente para lograr que las arenas se depositen por gravedad en el fondo del tanque. Posteriormente los sedimentos se remueven con rejillas hacia los canales existentes en las orillas de los tanques, para ser bombeados al área de manejo de lodos.

El siguiente proceso es el tratamiento del influente con óxido de calcio (cal) y sulfato férrico. Estos químicos son suministrados a la planta por vía terrestre, y almacenados en silos hasta su utilización. Se forma una mezcla de agua con cal hasta lograr una crema espesa, que se bombea a los reactores de contacto de sólidos donde se adiciona al influente. El sulfato férrico se mezcla también con agua, y es inyectado del mismo modo en los reactores.

Los reactores mencionados son de un diámetro cercano a los 56 m y una altura de 8 metros. Cada uno tiene una capacidad de 18 000 m³. Dentro de las tres gigantescas estructuras, el óxido de calcio y el sulfato férrico remueven más sólidos suspendidos en el agua y la suavizan librándola de casi la totalidad del calcio contenido en ella, que de otra manera dañaría las membranas. Los sólidos suspendidos se adhieren al óxido de calcio, mientras que el sulfato férrico ayuda a la formación de los lodos que se depositan en centro del fondo de los reactores. Posteriormente serán transportados a un engrosador de lodos donde serán aún más concentrados al depositarse. La disposición de los lodos se hace en estanques de evaporación 35 km al sureste de la planta desaladora, a donde son llevados a través de tuberías subterráneas. Los estanques se llenan con lodos, y después de secarse, se procede al relleno con material tomado de los alrededores (zona desértica). Los lodos secos pueden considerarse depósitos de óxido de calcio, e incluso puede pensarse en reciclarlos y utilizarlos como nutrientes en zonas agrícolas.

El agua clarificada es bombeada entonces hacia filtros de gravedad, previo a lo cual se le adiciona ácido sulfúrico que reduce su pH de 10.0 a 7.50. Esto se hace con el objetivo de erradicar la formación de carbonato de calcio que obstruiría los filtros. Las partículas más pequeñas de sólidos suspendidos son removidas al pasar por los filtros de antracita y arena. Dichos filtros se componen de 28 celdas, cada una de las cuales filtra aproximadamente 13 500 m³ de agua al día. Los sólidos atrapados en los filtros se remueven al lavarlos periódicamente.

El agua filtrada fluye hacia un gran tanque de almacenamiento subterráneo. En el trayecto vuelve a ser clorada para evitar el crecimiento de microorganismos y algas. El siguiente químico agregado es el hexametáfosfato de sodio, para evitar que se formen

incrustaciones en las membranas desaladoras de la ósmosis inversa, con lo que el pH es abatido hasta niveles de 5.50. El tanque tiene una capacidad de 13 500 m³.

Desde ahí, el agua es bombeada por 14 bombas de alta presión al área en la que se lleva a cabo la ósmosis inversa. Entra a las membranas a una presión promedio de 2 500 kPa (362 psi). Después de pasar por el proceso de desalación, un chorro a presión del agua de desecho es enviado en primera instancia a las unidades de recuperación de energía en tres de las bombas de alta presión, impulsando las turbinas que proveen de potencia a los impulsores. Esta estrategia evidentemente reduce los costos energéticos de todo el proceso. También se agrega al agua desalada amoníaco, para convertir a los residuos de cloro en una cloramina menos agresiva, que no daña las membranas y previene que entre ellas se genere crecimiento bacterial.

Evidentemente el corazón de la planta es el proceso de ósmosis inversa, en el que las sales son separadas del agua clarificada. Los elementos desaladores de la Planta desaladora de Yuma son unos contenedores de alta presión, cuyas características generales se mencionaron al inicio de esta sección. Las membranas utilizadas son una especie de sobre de varias capas, sellado en tres de sus cuatro lados. El extremo abierto está enrollado alrededor del tubo que constituye el centro del arreglo. Por este tubo fluirá el agua desalada, es decir, el flujo a presión irá hacia adentro.

Cada membrana tiene tres capas. La exterior está hecha de tela (una especie de poliéster grueso), cubierta con acetato de celulosa; la capa media es un tejido plastificado, y la interior es otra capa de tela cubierta con acetato de celulosa. El arreglo de membranas está enrollado alrededor del tubo con perforaciones que conducirá el agua desalada. El conjunto se encuentra dentro de los contenedores presurizados de forma cilíndrica, hechos de fibra de vidrio y cerrados en los extremos.

Durante el proceso de ósmosis inversa, el agua salada fluye a través de las membranas, forzada por la alta presión dentro del contenedor. De esta manera, las moléculas de agua son forzadas a pasar por entre el tejido de las fibras dejando detrás de sí los iones salinos, de diámetros considerablemente mayores, así como moléculas de agua ya asimiladas con la sal. Una vez que atravesó la membrana, el agua desalada es "atrapada" por el acetato de celulosa, que impide que fluya en dirección contraria. El agua clarificada viaja entonces a través de minúsculos canales traspasando la tela

plastificada, hacia el centro del elemento. Entra al tubo central, que transporta el producto final del proceso, a través de las perforaciones sobre la superficie del mismo.

La Planta Desaladora de Yuma es la instalación de desalación por ósmosis inversa más grande del mundo. El caudal de agua desalada indica que en un futuro cercano, esta alternativa de producción de agua podría llegar a satisfacer las necesidades emergentes de ciudades en franco crecimiento poblacional que tuviesen problemáticas de abastecimiento en el corto plazo.

Si bien los costos por volumen producido son aún poco competitivos cuando se les compara con los costos de métodos tradicionales, esta planta modelo parece indicar que volúmenes importantes de agua pueden ser tratados a través de la desalación; al tiempo que abrir las puertas para que en un futuro, el cambio en los modelos tradicionales y el desarrollo tecnológico sean al mismo tiempo justificantes e impulsores de una técnica que sin duda deberá desarrollarse masivamente de cara al nuevo siglo.

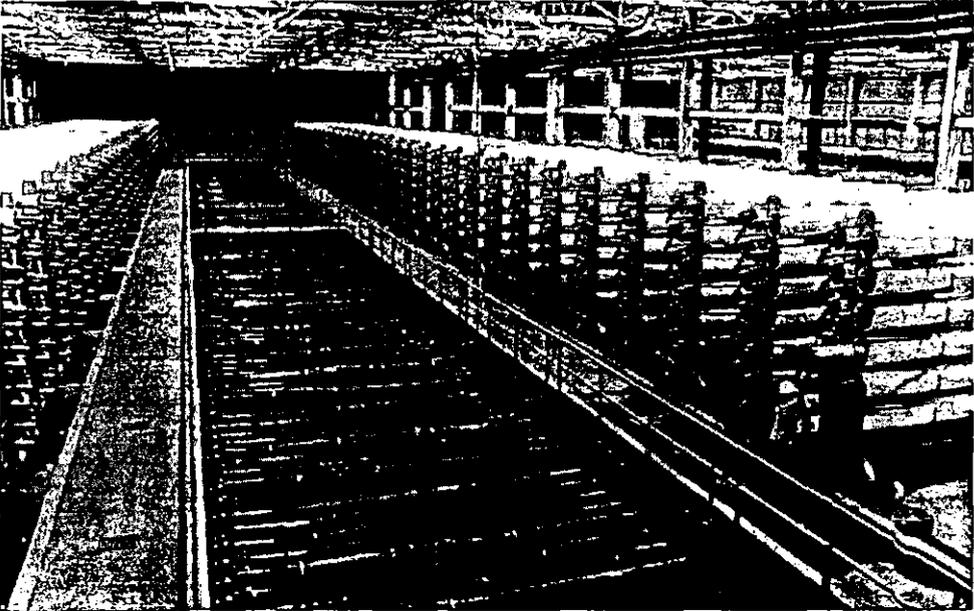


Figura IV.6. Elementos desaladores en la Planta de Yuma

CAPÍTULO III.

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE DESALACIÓN PARA LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA

III.1 Análisis técnico e hidráulico

Población de proyecto

En el capítulo I se presentaron los datos de crecimiento poblacional esperados tanto para la ciudad de Ensenada como para la de Tijuana, conjuntamente con las playas de Rosarito. Dichas prospecciones se tomaron de las estimaciones realizadas en ese sentido por la Comisión Nacional del Agua, en el plan maestro elaborado para cada una de las poblaciones en análisis. La técnica utilizada es un modelo aritmético simple, con un crecimiento constante algo menor que 60 000 habitantes por año (en el caso de Tijuana), lo cual implica crecimientos del 5% para 1999 y 3% para 2009, aproximadamente. Para Ensenada, CNA calcula crecimientos constantes de alrededor de 8000 habitantes, lo cual representa de ahora al 2010 entre 2.5% y 3% anualmente.

En el presente capítulo se hacen nuevas estimaciones de la población que se considerará en el análisis hidráulico del caso que nos ocupa. Ello se hizo con la intención de que ésta se apegue lo más posible al desarrollo histórico poblacional de cada entidad. En el caso concreto de Tijuana, por ejemplo, se considera que el modelo aritmético no es el más adecuado, dada la explosión demográfica que la ciudad ha sufrido en los últimos años. La opción no se descarta a priori, y por ello se realizaron en cada caso los cálculos con tres distintos modelos analizando los resultados de cada uno de ellos, para elegir el más adecuado tomando en cuenta las tendencias históricas. Cabe destacar que se incluyen cálculos hasta el año 2020, si bien el análisis posterior se hará únicamente hasta el 2010. Esto contempla dos aspectos; el primero, que los alcances de este trabajo se proyectan solamente en ese mediano plazo, el segundo, que la explosión demográfica depende en gran medida de fenómenos socioeconómicos cuyo desarrollo no es trivial en lo absoluto, por lo que tomar como certeras las estimaciones a largo plazo sería al menos aventurado, en especial en una ciudad tan cambiante como lo es Tijuana.

Los cálculos presentados incluyen el crecimiento poblacional a partir del año de 1950, para lo que se consultaron los datos censales obtenidos por el Consejo Nacional de Población (CONAPO) y el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). De 1950 a 1990 se trata de censos federales, mientras que para 1995 se registran datos del censo estatal. Se incluyen las poblaciones históricas de los cuatro municipios que conforman la entidad, incluyendo Mexicali y Tecate. Esto se hace solamente con fines de una comparación que sitúe a las poblaciones en análisis dentro del marco de desarrollo estatal.

*Tabla III.1. Población por entidad, Censos de Población y Vivienda.
Estado de Baja California Norte.*

Año	Ensenada	Mexicali	Tecate	Tijuana
1950	18150	64609	3681	59952
1960	42561	174560	6588	152374
1970	77687	263498	14738	277306
1980	120483	341559	23909	429500
1990	169426	438377	40240	698752
1995	192550	505016	47005	966097

Estado de Baja California Norte. Crecimiento poblacional histórico por cabeceras municipales.

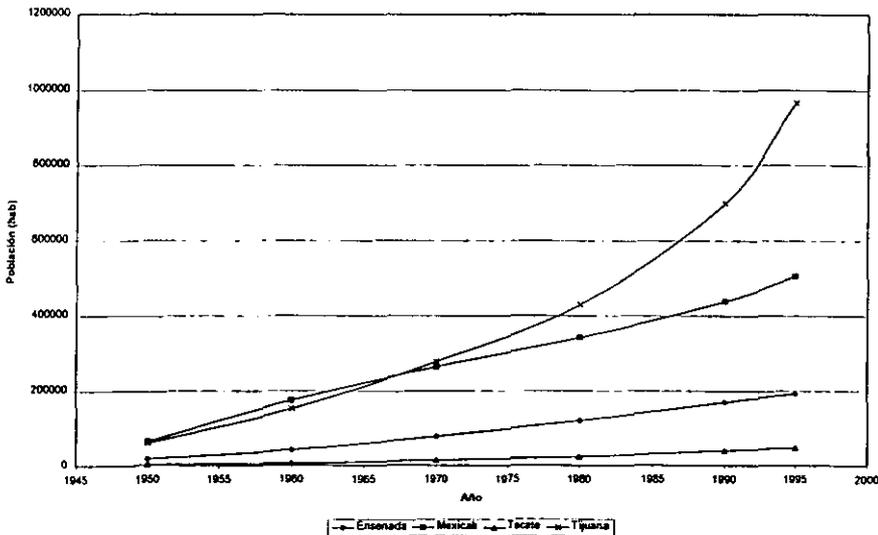


Figura III.1.

Como puede observarse, el crecimiento de la ciudad de Tijuana dista mucho de ser constante a lo largo de su historia. Como muestra de la creciente tendencia en las últimas décadas, a continuación se muestra una gráfica poblacional comparativa entre los municipios de Tijuana y Tecate, a partir del año de 1930.

Comparación de población municipal, Tijuana y Mexicali

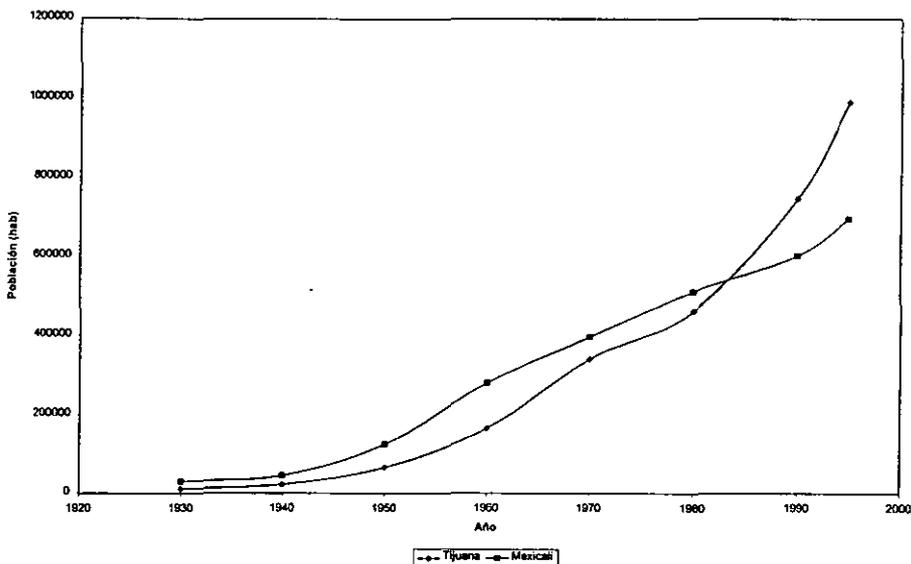


Figura III.2

Para calcular la población de proyecto tanto de Ensenada como de Tijuana, se utilizaron tres distintos modelos: aritmético, geométrico e incrementos diferenciales. Los resultados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla III.2. Resumen de resultados.

Ciudad	Ensenada			Tijuana		
Modelo	Aritmético	Geométrico	Incr. Dif.	Aritmético	Geométrico	Incr. Dif.
2000	215674	218830	215422	1233442	1335729	917395
2010	261922	282640	269595	1768132	2553370	1194981
2020	308170	365057	331945	2302822	4881003	1531510

La selección del método más adecuado en cada caso se hará a través de la graficación de estos resultados, conjuntamente con los registrados a partir de 1960. La intención es que la gráfica muestre cuál es la tendencia histórica y que en ella pueda apreciarse cuál de los tres métodos es más apropiado en cada caso.

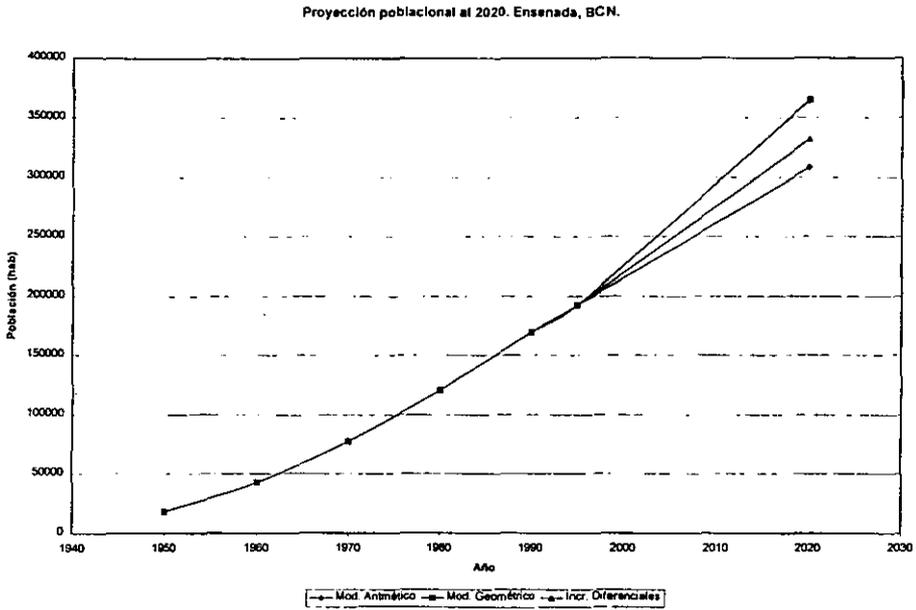


Figura III.3

La curva más suave es la que se obtiene con el método de incrementos diferenciales. Así, la población de proyecto para el año 2010 de la ciudad de Ensenada será de 269 595 habitantes.

Proyección poblacional, 2020. Tijuana, BCN

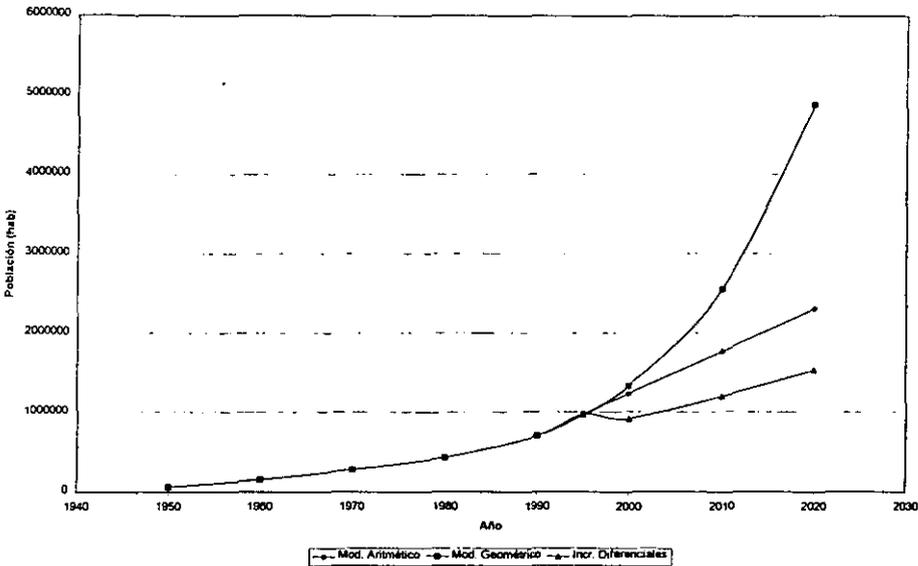


Figura III.4

El gráfico evidencia que utilizar como criterio el modelo aritmético resultaría demasiado conservador. La curva obtenida con el modelo geométrico corresponde de manera más cabal al desarrollo demográfico histórico de la ciudad. Si bien parece difícil pensar que en el año 2020 se alcancen en Tijuana cerca de 5 millones de pobladores, se puede aceptar que la población obtenida a partir de este último método para 2010 es razonable. La población de proyecto será, en consecuencia, de 2 553 370 habitantes.

La curva correspondiente al método de incrementos diferenciales muestra una tendencia más bien irregular. Ello se debe a que para la aplicación de este método deben considerarse periodos constantes de tiempo a lo largo del desarrollo histórico. Así, no era posible utilizar el dato de población obtenido en la entidad para 1995, pudiendo utilizar los datos censales de cada 10 años hasta 1990. Es justamente en estos últimos años que se ha presentado una explosión demográfica muy considerable en Tijuana, y que evidentemente determinará el ritmo de crecimiento en los próximos años. Así, incluso para el año 2000 el método arroja una población menor a la que se

registraba ya en el año de 1995. Como en la graficación se registró este último dato, la curva adquiere la tendencia irregular que puede observarse. De manera evidente, el método no es adecuado para el caso pues el dato que dispara la tendencia no pudo ser considerado.

Volúmenes de abastecimiento

A continuación, y a partir de las poblaciones de proyecto obtenidas, se procede al cálculo de los gastos de abastecimiento progresivos en el tiempo. Para ello se utiliza la dotación apropiada para el tipo de poblaciones.

La dotación es la cantidad de agua que se asigna a cada habitante y que comprende todos los consumos de los servicios que se hacen en un día medio anual, incluyendo pérdidas. Por supuesto que la dotación de agua potable, si el sistema de abastecimiento es eficiente y suficiente, es función del clima, del número de habitantes y sus costumbres, del costo del agua distribuida y de las medidas de control para evitar fugas, desperdicios y hacer uso racional de ella. Se consideran para fines de proyecto, ya sea la aplicación de los datos experimentales que se recaben en la población en cuestión, los que se adapten de otras en condiciones similares o, a falta de éstos, se acaten normas de dotación media en función del número de habitantes y el clima, como se indica en el cuadro que sigue, aplicable a las poblaciones del país, expresada en litros por habitante por día (l/hab/día). Estas dotaciones están determinadas en las Normas de proyecto para obras de Aprovechamiento de Agua Potable en Localidades Urbanas de la República Mexicana; Dirección General de Agua Potable y Alcantarillado.

Tabla III.3. Dotación de Agua Potable (l/hab/día)

Número de habitantes	Clima		
	Cálido	Templado	Frio
2500 a 15000	150	125	100
15000 a 30000	200	150	125
30000 a 70000	250	200	175
70000 a 150000	300	250	200
Mayor de 150000	350	300	250

De acuerdo con los registros del INEGI, el clima de la región es seco y templado. Por ejemplo, en la estación meteorológica de Ensenada, las temperaturas mínimas y máximas mensuales en el año de 1997 fueron de 13.7°C y 24.3°C, respectivamente. Ello se debe a que, si bien la latitud corresponde a climas mucho más calurosos, como Mexicali, se trata de ciudades costeras, y la cercanía con el mar las convierte en ciudades de clima templado y agradable. Así, y de acuerdo con los criterios presentados anteriormente, dado el tamaño de las poblaciones, la dotación de proyecto será de 300 l/hab/día para ambas ciudades.

A continuación se muestra el cálculo de los volúmenes de abastecimiento, expresándolo finalmente para términos de análisis en m³/s.

Tabla III.4. Cálculo de gastos de diseño

Año	Ensenada			Tijuana		
	Población (hab)	Q (l/día)	Q (m ³ /s)	Población (hab)	Q (l/día)	Q (m ³ /s)
1990	169426	5.08E+07	0.588	698752	2.10E+08	2.426
1995	192550	5.78E+07	0.669	966097	2.90E+08	3.355
2000	215422	6.46E+07	0.748	1335729	4.01E+08	4.638
2010	269595	8.09E+07	0.936	2553370	7.66E+08	8.866

Ahora se procede a calcular los volúmenes deficitarios que se presentarán en los años venideros en ambas ciudades. Para ello se toman los datos de los gastos presentes de abastecimiento, conjuntando todas las fuentes existentes. Los datos provienen del plan maestro para abastecimiento de agua potable elaborado por la Comisión Nacional del Agua para ambas entidades. El cálculo de los volúmenes deficitarios se hará considerando que no se modificasen dichos gastos de abastecimiento a partir de ahora y hasta el año 2010.

Oferta y demanda de agua potable. Ensenada, BCN.

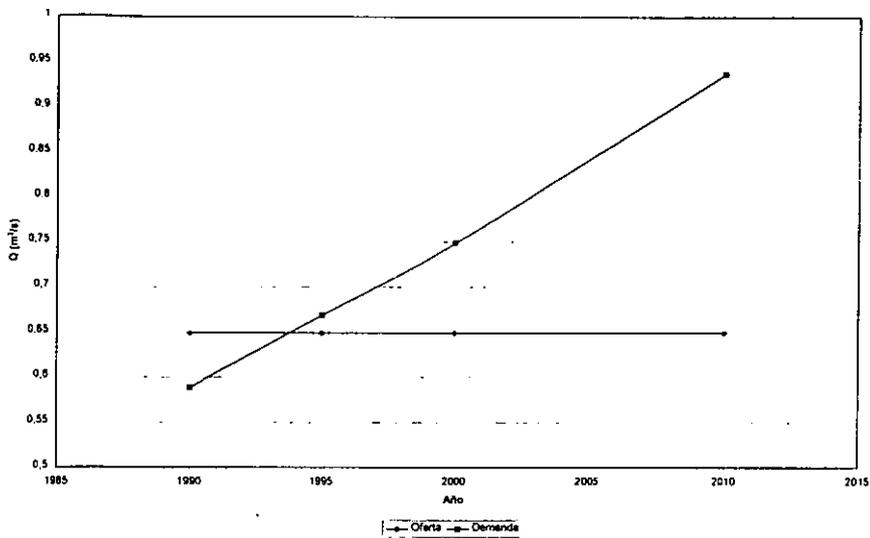


Figura III.5

Oferta y demanda de agua potable. Tijuana, BCN.

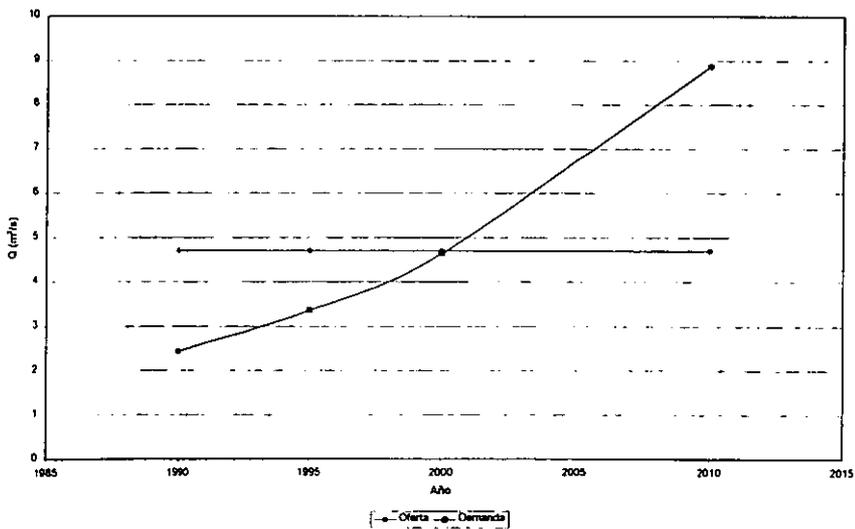


Figura III.6

Cabe señalar que en el capítulo I se presenta un análisis similar, pero contenido en los mencionados planes maestros de CNA. En este apartado se concentran los resultados y criterios alcanzados hasta este punto en el presente trabajo de tesis.

Los gastos deficitarios para el año de 2010 son respectivamente de 0.287 m³/s para Ensenada y de 4.166 m³/s para Tijuana.

Selección del método

En cuanto a la técnica de desalación que es más adecuada para la zona en estudio, deben hacerse varias consideraciones.

- a) Las distintas técnicas tienen diferencias importantes en cuanto al grado de desarrollo tecnológico de cada una. Mientras que la humanidad ha destilado agua salina por siglos, la electrodiálisis y la ósmosis inversa son procesos relativamente recientes, cuyo desarrollo se ha dado a partir de mediados de este siglo. Ello desde luego implica que, mientras que en la primera se puede hablar de una técnica sencilla y que puede realizarse a niveles incluso domésticos, las dos últimas requieren de equipos especializados y en un alto porcentaje importados; simplemente las membranas utilizadas en ambos casos no se fabrican en el país. Sin embargo, distintas compañías transnacionales han proveído por décadas a distintas naciones de esos elementos que son en sí el corazón de la desalación, a precios que tienden a ser cada día más competitivos.
- b) Hay dos inconvenientes preclaros en cuanto a la destilación. El primero lo constituyen los volúmenes que se pueden obtener. Una planta de destilación solar puede llegar a producir algunas decenas de litros diariamente. El incrementar de manera importante la producción implicaría también grandes extensiones que pudiesen captar la mayor cantidad de energía posible, lo cual lleva a complicaciones de otra índole, como lo son el uso de suelo y desde luego las implicaciones operativas que deben ser objeto de estudios más específicos. El segundo son las consideraciones energéticas. Aún no se ha desarrollado de manera extensiva el uso de la energía solar, y si bien es cierto que esa posibilidad será seguramente el futuro energético de la humanidad, también lo es que a la fecha aún no se ha logrado el desarrollo necesario en cuanto a captación,

almacenamiento y recirculación se refiere. La posibilidad de destilar agua marina suministrando el calor necesario para evaporarla por medio de otras fuentes implicaría un consumo energético de dimensiones importantes con las consecuencias económicas de ello, y sería asimismo objeto de estudios de mayores alcances.

- c) La experiencia demuestra que tanto por electrodiálisis como por ósmosis inversa pueden obtenerse los volúmenes necesarios, obtenidos en el desarrollo del presente capítulo. Ambas técnicas son ampliamente utilizadas en distintos procesos industriales, y en particular la ósmosis inversa se utiliza en distintas partes del mundo para producir agua potable. El caso más claro es el de la planta desaladora de Yuma, cuyo gasto efluente es de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual cubriría incluso las necesidades de Tijuana hasta el año 2010.
- d) La diferencia principal entre estas dos técnicas se da en cuanto a las características del influente. La especificidad y delicadeza de los elementos presentes en la electrodiálisis permiten desalar solamente aguas salobres, es decir con niveles salinos moderados. El límite máximo de contaminantes inorgánicos que podrían ser tratados es de unos 5000 mg/l , obteniendo agua clarificada con concentraciones fluctuando entre 100 y 500 mg/l . La ósmosis inversa, en cambio, puede tratar exitosamente agua marina, con concentraciones de hasta $36\,000 \text{ mg/l}$. La gran ventaja de la ósmosis inversa sobre otras tecnologías es que puede remover hasta un 99.99% de las sales que le llegan, sin afectar mucho que el agua sea altamente salobre; pero igualmente, remueve el 100% de todos los virus y bacterias que se encuentran en la alimentación.

Dado todo lo anterior, y considerando el desarrollo del marco teórico de este trabajo de tesis, se opta por la ósmosis inversa como la técnica de desalación más adecuada, sujeta al análisis posterior confrontándola con otras posibilidades de abastecimiento alternativo de agua potable para las ciudades costeras de Baja California Norte. Es sin duda la técnica más versátil, que nos permitiría tratar aguas con muy distintas concentraciones salinas, además de que está comprobado en experiencias anteriores que puede proveer con una sola planta gastos de agua clarificada muy cercanos al requerido.

III.2 Análisis económico

El agua como recurso es uno de los componentes fundamentales y básicos de la vida. Aún así, sólo 1% del agua de la Tierra es apta para el consumo humano. Esta pequeña cantidad es cada vez más inadecuada, particularmente en ciertas áreas geográficas del mundo o en áreas de alta densidad de población debido a contaminación y escasez de lluvias.

Desalinizar el agua se ha considerado desde hace mucho como una solución al problema de falta de agua en el mundo. Pero la desalinización es costosa e inasequible en los lugares donde más se necesita. No obstante, las plantas de desalación alrededor del mundo producen hoy cantidades de metros cúbicos de agua potable que se cuentan por millones. Sin embargo, la demanda de agua continúa excediendo el suministro disponible.

Para entender el problema (incluyendo el balance económico y social) que se cierne ahora sobre el mundo, los siguientes datos son ilustrativos. La producción de una tonelada de acero requiere 182 000 litros de agua; en la producción de una tonelada de aluminio se emplean 1 364 000 litros del líquido. Producir una tonelada de petróleo en una refinería de crudo requiere 91 000 litros, y una tonelada de fibras artificiales necesita 909 000 litros de agua. Tomando éstas y otras estadísticas similares para otras industrias, la producción de una tonelada de usos industriales representa el consumo de 200 toneladas de agua. En resumen, en términos de toneladas producidas, el agua suministrada a una zona industrial representa el 99.5% del peso de los insumos. Este hecho implica algunos fundamentos económicos importantes ignorados por largo tiempo. El primero es que la expansión industrial o el desarrollo es imposible sin grandes cantidades de agua. El segundo es que a menos que el agua pueda obtenerse a un costo menor por unidad que los demás materiales involucrados en un producto industrial, la producción será cara e impráctica. Así, se entiende que la carencia de agua de calidad apropiada constituye un formidable freno al desarrollo.

Existen más de 7 500 plantas de desalación en operación alrededor del mundo produciendo varios millones de galones de metros cúbicos de agua por día. De ellas,

57% están en el Medio Oriente y 12% de la capacidad mundial se produce en América, estando la mayoría de las plantas en el Caribe y Florida.

A medida que continúa creciendo la demanda y las preocupaciones sobre la disponibilidad de agua se incrementan, se han propuesto numerosos proyectos de desalación. A pesar de la situación económica, la demanda del mercado aún excede la capacidad de la industria para producir agua. De hecho, se intenta reclamar áreas áridas que presentan crecimiento poblacional, desarrollo industrial y económico, y se señala una necesidad de mercado continuada y sólida. Sin embargo el sistema de multimillones de litros por día promovido durante los últimos años está perdiendo mercado. Debido a factores económicos simples, las instalaciones existentes no se han materializado como se proyectaba. De acuerdo a los reportes más recientes de desalación de agua, un periodo de la industria reconocido, la tendencia del mercado actual es mucho menor al esperado.

La situación de México es precaria, en términos de que las necesidades se concentran en el altiplano, cada vez más lejos de las fuentes, y la procuración del recurso en regiones aledañas produce cada día más fricciones regionales. Esta situación es ya característica de las principales ciudades del país, aunque el grado de deterioro del acuífero del Valle de México es especialmente grave.

Esta realidad se refleja en una estructura de costos favorable a las nuevas técnicas. En efecto, se calcula que el costo de traer a la Ciudad de México un metro cúbico de agua mediante el sistema Cutzamala es del orden de casi un dólar americano, y que darle las condiciones para consumo humano, llevarlo a cada vivienda y compensar las mermas cuesta quizá otro tanto. Dadas las tarifas *planas* que se tienen en este renglón, resulta que el gobierno está obsequiando a los ciudadanos, sin distinción social alguna, 13 de cada 14 pesos que cuesta el agua, sin internalizar los costos asociados al posible daño de distraer el recurso de su cuenca original.

La situación actual ha llevado a la descapitalización del sector, y entre otras consecuencias, a una tendencia al deterioro en la calidad del servicio. La falta de confiabilidad en la calidad del agua empuja cada día a más mexicanos a comprar agua

embotellada, a precios que son varios cientos de veces mayores al oficial. Aún así, la confiabilidad de muchas de las marcas de agua es dudosa.

Así, es posible que en breve resulte viable invitar a capitales privados a participar en las estrategias de desalación, en esquemas financieros de riesgo compartido que ya se conocen en otras partes del mundo, y que resultarían económicamente atractivas, sin que el gobierno deba renunciar a su autonomía ni a su rectoría en el tema.

La razón por la que hasta el momento no se ha implementado la desalación de manera extensiva en todo el mundo es preclara: los costos de este proceso son muy superiores a los de los tradicionalmente utilizados en la obtención de agua potable. Ello se ilustra en la siguiente tabla, que muestra los rangos económicos en los que se manejan algunos de los métodos mencionados en este trabajo, comparándolos en última instancia con la desalación. Los precios presentados son por metro cúbico de agua clarificada.

Tabla III.5. Costos de potabilización por metro cúbico.

\$14.50-\$16.20					
\$12.90-\$14.50					
\$11.30-\$12.90					
\$9.70-\$11.30					
\$8.10-\$9.70					
\$6.40-\$8.10					
\$4.80-\$6.40					
\$3.20-\$4.80					
\$1.60-\$3.20					
\$0 - \$1.60					
	Conservación	Captación superficial	Aguas subterráneas	Transporte	Desalación de agua marina

Si bien la comparación parece ser ampliamente desventajosa para el agua desalada, hay que tomar en cuenta que las condiciones de la zona en estudio son disímiles a las concentradas en la tabla. Es decir, dado que se trata de una zona árida, prácticamente pueden desactarse las captaciones superficiales, pues los cuerpos de agua existentes no lo permiten; asimismo, las precipitaciones anuales, con índices extremadamente bajos, no permiten pensar en la construcción de embalses, anuado esto al raquitico sistema hidrológico en la región.

Otro punto que es muy importante de tomarse en cuenta es que el agua que se obtiene actualmente a través del acueducto Río Colorado – Tijuana implica costos mucho más elevados que los índices tradicionales. Un metro cúbico de agua potable en la zona cuesta actualmente \$6.55 (FERNÁNDEZ Zayas, José Luis, *Tecnologías para la desalinización del agua*), lo cual implica que las consideraciones de competitividad de precios deben hacerse con este parámetro, al menos revelador. Por ello no se puede descartar, a priori, la factibilidad económica de la desalación, como podría hacerse en zonas con condiciones similares.

En la búsqueda de hacer de la desalación una opción viable económicamente para la obtención de agua potable en Baja California, hay otro aspecto que debe tomarse muy en cuenta. Los costos del agua desalada son una función directa del grado de salinidad del agua que entre al sistema. Así, si bien el desalar agua marina directamente puede adquirir niveles de precios impensables, no ocurre lo mismo con aguas salobres, o con influentes previamente tratados por otros métodos. El siguiente gráfico ilustra las disimilitudes que pueden existir a este respecto, variando las características de la fuente que alimente a la planta desaladora.

Costos de desalación por metro cúbico, según tipo de fuente.

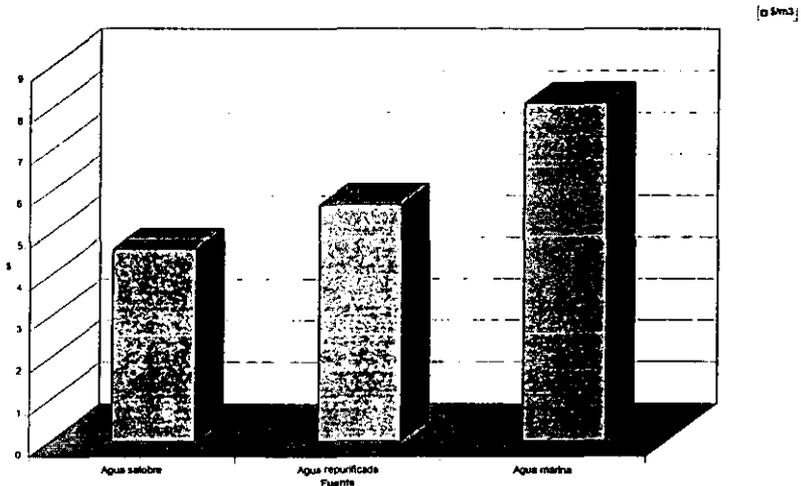


Figura III.7

Así, si bien parece difícil pensar que en el corto plazo pudiesen ser obtenidos volúmenes considerables de agua potable partiendo de agua marina, que pudiesen satisfacer al menos medianamente la demanda proyectada, resulta en cambio promisorio la posibilidad de tratar aguas con niveles salinos más moderados, bien sea tomados de depósitos naturales de aguas salobres o los provenientes de la red de colección de aguas residuales, pasando previamente por un tratamiento de repurificación.

CAPÍTULO IV.

ALTERNATIVAS DE ABASTECIMIENTO A CORTO PLAZO

IV.1 Reuso de agua

Fuentes futuras de agua recuperada

Dadas las condiciones económicas de la desalación como fuente de abastecimiento de agua, así como la inminente necesidad de ampliar la capacidad de captación del recurso para la región noroccidental de la península de Baja California, deben considerarse otras alternativas para la solución del problema en el corto plazo. Una de ellas es el mejor aprovechamiento de las aguas residuales de la zona, a través de ampliar el horizonte del tratamiento de aguas recuperadas. En términos simples, reciclar agua. En este capítulo se analizarán las condiciones actuales de reutilización de aguas residuales, y las perspectivas a futuro de esta alternativa.

Condiciones actuales

Es interesante hacer notar que no existen, para la ciudad de Tijuana, datos confiables en lo que a recuperación de agua se refiere. A principios de 1998 se presentó ante la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana (CESPT) una propuesta para llevar a cabo un estudio minucioso de los mercados potenciales para agua reciclada en Tijuana. El estudio también abarcaría un análisis de los mantos acuíferos del Río Tijuana ubicados al sur de la frontera. Tendría como objetivos propiciar la planificación transfronteriza en materia de agua y promover la producción y uso de agua reciclada a fin de complementar las decrecientes existencias de agua potable en el área de Tijuana. A la fecha, dicho estudio no se ha iniciado aún.

La única obra conocida en Tijuana para la recuperación de agua es el *Ecoparque*, que trata aproximadamente 340 m³ diarios de aguas residuales de un área residencial. El tratamiento consiste en una criba, un hidrotamiz, un biofiltro y un clarificador final. El efluente no desinfectado se utiliza en el riego de las colonias cercanas. La demanda biológica de oxígeno (DBO) y el total de Sólidos Suspendedos (SS) en el afluente es de 450 a 600 mg/l, mientras que los registros de los mismos índices en el efluente están entre 80 y 90 mg/l.

Mercados probables de agua recuperada

El mercado natural de las aguas recuperadas es el riego de áreas verdes. Sin embargo, existen otras tres posibilidades de utilización poco explotadas, cuya consideración está plenamente justificada: aplicaciones industriales, riego en la agricultura y abastecimiento de agua potable.

- ◆ **Aplicación industrial.** La viabilidad de esta alternativa requiere de un estudio minucioso, dada la diversidad de requisitos sobre la calidad de aguas industriales, aunado al hecho de que el grueso de las maquiladoras, principal industria tijuanaense, se encuentran dentro de la zona urbana. Hay sin embargo otras concentraciones industriales, como las ubicadas en la proximidad de la mesa de Otay, susceptibles de ser mercado de agua recuperada. Hay que señalar que para ello sería necesaria la ampliación del sistema de distribución del distrito de aguas de Otay.
- ◆ **Riego agrícola.** Para poder considerar esta opción, hay que puntualizar que existen ciertos tipos de cultivos que exigen una calidad de agua menor a la que requieren, por ejemplo, los de frutos expuestos. El programa de tratamiento podría resultar idóneo para las instalaciones de la planta de San Antonio de los Buenos, ya que es la más próxima a las tierras agrícolas de las fuentes de agua recuperada de las mencionadas en este trabajo.
- ◆ **Suministro de agua potable.** Los acuíferos subterráneos siguen un proceso de tratamiento natural, por medio de la filtración a través de rocas, principalmente. De esta manera, una forma alternativa de utilización del agua recuperada es la recarga de los acuíferos, para su posterior extracción por métodos diversos. De esta manera, el inyectar aguas recuperadas al acuífero de la cuenca del Río Tijuana (3000 kilómetros cuadrados) parecería asegurar un aumento muy importante en los volúmenes de extracción. El acuífero suministra actualmente alrededor de 15 m³ al día, a través de pozos que operan de manera intermitente. Desde luego, previamente a la inyección, sería necesario alcanzar a través de procesos de tratamiento, las normas fijadas en cuanto a la calidad del agua para este fin por el

gobierno de nuestro país. Además, dado que la cuenca del Río Tijuana se extiende en al menos una tercera parte en territorio estadounidense, todo programa de inyección de agua al subsuelo también requeriría de un plan binacional para la administración de acuíferos y así prevenir un posible impacto adverso en el suministro y calidad del agua. A continuación se muestra una tabla de los límites permisibles fijados por la Norma Oficial Mexicana en cuanto a distintos contaminantes.

Característica	Límite permisible
Color	15 unidades de color verdadero en la escala del platino cobalto
Olor y sabor	Agradable (sin exceder los límites de criterios biológico – químicos)
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método
Organismos coliformes Totales	2 NMP/100 ml
Organismos coliformes fecales	2 NFC/100 ml 0 UFC/100 ml

Fuentes futuras de abastecimiento de agua recuperada

Existen diversas obras de infraestructura proyectadas a ambos lados de la frontera que podrían constituir fuentes de agua recuperada para satisfacer mercados potenciales en el área de Tijuana. Dichas obras se refieren a continuación.

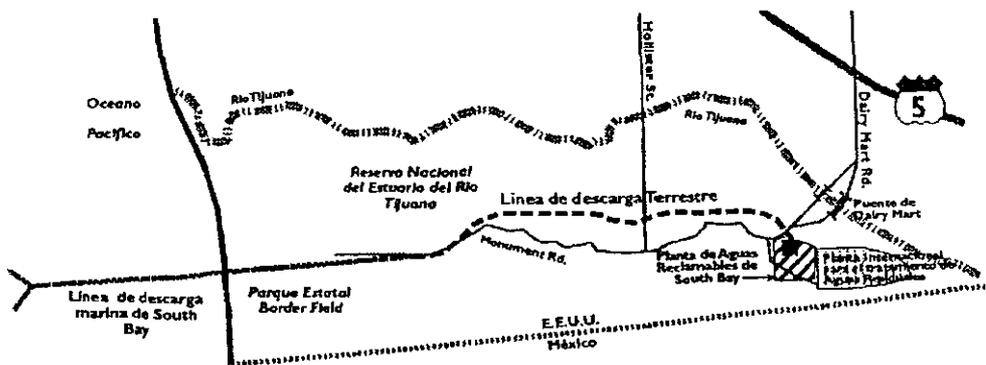
- ◆ Planta de Recuperación de Agua del Área Sur de la Bahía (*South Bay Water Reclamation Plant, SBWRP*). Dicha planta se encuentra actualmente en construcción por medio del Departamento Metropolitano de Aguas Residuales de San Diego. Para su conclusión, en el año 2001, se espera que produzca 26 500 m³ al día de agua recuperada. Las instalaciones podrían doblar su capacidad si la demanda así lo justifica.
- ◆ Planta para la Recuperación de Agua del Valle de Otay (*Otay Valley Water Reclamation Plant, OVWRP*). El área de la mesa de Otay es una región en el territorio estadounidense que se encuentra aún en estado rústico. En ella el Departamento Metropolitano de Aguas Residuales de San Diego ha proyectado esta

planta para que funcione como sistema de recuperación de aguas para el sur de la ciudad. Sin embargo, dada la baja demanda de la zona, en la cual se encontrarían el grueso de los mercados, no se ha fijado fecha para la construcción de las instalaciones. De esta manera, el proyecto forma parte de los planes a largo plazo del Distrito de Aguas de Otay (*Otay Water District, OWD*). Algunas secciones del sistema de distribución de agua serían construidas muy cerca de la frontera, y consecuentemente, podría aprovecharse para atender mercados de agua recuperada en Tijuana, que se encuentren ubicados inmediatamente al sur del área de servicio del distrito.

Como antecedente para vislumbrar un modelo para la transferencia de agua recuperada a través de la frontera puede tomarse el acuerdo mediante el cual la OWD ha aceptado transportar a Tijuana una parte de las aguas del Río Colorado asignadas a México en caso de surgir alguna situación de emergencia.

Planta Internacional para el Tratamiento de Aguas Residuales, PITAR.

Desde 1985 se realizaron recomendaciones para solucionar el problema de saneamiento en la zona Tijuana - San Diego, nuestro país hizo propuestas para construir obras para evitar el escurrimiento de aguas residuales sin tratar por el Río Tijuana y los cañones El Matadero y Los Laureles, que eventualmente se presentaban por fallas o derrames en la Planta de Bombeo N°1, mismas que son vertidas a una conexión de emergencia en donde son pretratadas para posteriormente ser conducidas a la planta de tratamiento en Point Loma, en la ciudad de San Diego. Dado el crecimiento de Tijuana y la construcción de la infraestructura de recolección, se manifestó la intención de construir una planta de tratamiento en la margen derecha aguas arriba de la confluencia del Arroyo Alamar con el Río Tijuana, que correspondería a la 2ª etapa de la planta de San Antonio de los Buenos. Sin embargo es hasta 1990 cuando Estados Unidos formalizó su propuesta para construir una planta de tratamiento secundario en su territorio, próxima al lindero internacional y con capacidad de 1.1 m³/s, las obras de conducción para su alejamiento y la disposición en territorio mexicano de lodos generados.



Croquis de localización. Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales

La PITAR, un proyecto conjunto de Estados Unidos y México, permite un tratamiento avanzado primario de aguas residuales desviadas corriente arriba de la Planta de Bombeo N°1 en Tijuana. La capacidad inicial de la planta es de 94600 m³ al día (un poco más de 1 m³/s), pero ha sido diseñada para manejar casi cuatro veces ese volumen diario. Actualmente, el efluente de la planta está siendo bombeado al sistema metropolitano y así continuará hasta que se terminen las obras o el emisor submarino. Se llevará a cabo el tratamiento secundario una vez certificado el informe suplementario de impacto ambiental emitido hace poco. La estructura para el control del efluente establece que las aguas tratadas sean devueltas a México para volver a usarse, de ser posible.

Aqua Clara, una empresa particular, y el estado de Baja California, están trabajando en este proyecto en forma conjunta y ya han presentado una propuesta para aprovechar efluentes de la PITAR y así atender varios mercados que requieren agua recuperada en Tijuana. Tal y como se señaló en la solicitud de préstamo presentada ante la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF), la obra requiere de un plan escalonado para el diseño, construcción y operación de una planta para el tratamiento de aguas residuales y para el suministro y almacenamiento de agua. De esta manera se podrían atender las necesidades del sur de San Diego y el área de Tecate y Tijuana en la Baja California. Según concebido, el proyecto consiste en lo siguiente.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Transporte del efluente

Una estación de bombeo y un acueducto de 10.9 kilómetros para transportar 94600 m³ al día del efluente de la PITAR a una nueva planta de tratamiento ubicada en la región del Río Alamar en Tijuana. El alineamiento del acueducto seguiría el derecho de paso de la canalización del Río Tijuana.

El proyecto incluye interceptores de los flujos provenientes de los cañones del poniente de Tijuana (Los Laureles y El Matadero) para su conducción por gravedad a la planta binacional. El alejamiento del efluente estará compuesto de una estructura distribuidora, un emisor terrestre ya construido entre 1991 y 1994 con 4.1 km de longitud y 3.7 m de diámetro, un túnel - caída de 58 m de 10.9 metros de diámetro, un tiro ascendente de 49 m con 2.7 m de diámetro. Después continúa a través de un emisor sobre el lecho marino de 1.41 km de longitud con 3.05 m de diámetro, del cual se conecta una estructura que divide en dos cuerpos de difusores/dispersores en forma de "y" de 600 m de longitud, con diámetros de 84, 72 y 54 pulgadas.

Instalaciones para tratamiento y producción

La planta del Río Alamar contaría con instalaciones para tratamiento secundario, terciario y avanzado. Las cantidades de agua tratadas a cada nivel dependerían de la demanda de cada tipo y su relación con el costo de producción. El efluente de la planta no utilizado se disolvería a través de la frontera por tubería independiente, para su descarga en el mar.

El primario avanzado consiste en un módulo con instalaciones para recepción del influente, desarenadores, sedimentadores primarios, desinfección con cloro, almacenamiento, manejo y estabilización de lodos con cal, así como un sistema reductor de olores. El proceso secundario incluye un tratamiento a base de lodos activados, sedimentación secundaria, cloración y dechloración.

Transporte y almacenamiento del agua

Se construirían estaciones de bombeo, tubería de distribución y tanques de almacenaje para transportar el agua recuperada a los usuarios.

Obras interinas

Además de las obras propias de la planta, descritas anteriormente, el proyecto contempla la construcción en territorio mexicano de una nueva planta de bombeo en terrenos próximos a la PB - 1 y una línea de conducción a presión de 16 km de longitud en un primer tramo, paralela a la existente para una capacidad del nuevo sistema de 2.2 m³/s para conducir aguas tratadas en la planta binacional en tanto no operen la misma así como los emisores terrestres y submarinos, y después como respaldo en caso de reparaciones de las instalaciones mexicanas existentes. Esta obra será realizada por México con una aportación estadounidense de 16 millones de dólares y si es necesario se complementará con recursos de la CESPT.

El financiamiento del proyecto sería responsabilidad de Aqua Clara, a través de una combinación de aportaciones privadas y medios internacionales públicos o cuasipúblicos. Sería responsabilidad de *Bechtel Corporation* el diseño y construcción de la obra. La operación y mantenimiento correría por cuenta de una filial de Aqua Clara.

Nuestro país participa con el costo equivalente correspondiente a la construcción de la planta propuesta por México en el Arroyo Alamar, que asciende a 16.8 millones de dólares que se pagan en 10 anualidades a partir de la puesta en operación de la planta binacional; también participa en los costos de operación y mantenimiento con 0.034 dólares por metro cúbico de agua tratada, además del retiro y disposición final de los lodos.

Planta de tratamiento propuesta para Tijuana

En un reciente informe titulado *Infraestructura hidráulica para saneamiento ambiental y el suministro de agua potable en la Baja California (Mexicali - Tijuana - Ensenada)*, se sopesaron diversas alternativas para el tratamiento y disposición de las aguas residuales de Tijuana hasta el año 2010 (una de las alternativas consistía en ampliar la PITAR). La alternativa recomendada, basada en consideraciones de carácter técnico y

económico, incluye la construcción de una planta para tratamiento secundario en un lugar próximo a la confluencia de los ríos Tijuana y Alamar. Parte del efluente de la planta se utilizaría para el riego de parques, áreas verdes y viveros. Éstos eran precisamente los usos contemplados en el Plan Maestro preparado por la CESPT en septiembre de 1995. El exceso del efluente sería transportado a la PITAR para su descarga en el mar. De esta forma, al ponerse en práctica este proyecto, se daría a Tijuana una fuente de agua recuperada.

IV.2 Agua repurificada

A través del ciclo natural del agua, nuestro planeta ha repurificado agua por millones de años. La tecnología de repurificación está inspirada en ello y su fin último es imitar al máximo el proceso que se desarrolla de manera natural en la Tierra.

El proceso inicia con agua recuperada. Esto es, agua que originalmente podía considerarse residual y que tras distintos procesos ha alcanzado una calidad no deseable para consumo humano, que en cambio puede ser tranquilamente utilizada con fines de riego y en la gran mayoría de los procesos industriales. De esta manera, pensar en la repurificación de agua debe ir íntimamente ligado con estrategias cada vez más eficientes de obtención de agua recuperada. Es importante mencionar que tras las diferentes etapas que componen la repurificación, el efluente obtenido será inyectado en mantos acuíferos o bien descargado en fuentes de agua dulce, tales como las reservas naturales o artificiales, o bien directamente en el cauce de algún río.

El agua recuperada será tratada posteriormente a través de procesos que podrían catalogarse como de barreras múltiples, es decir que incorporan distintos niveles de tratamiento de manera cíclica. Ello incluye ultra o micro filtración, ósmosis inversa y ozonización; el fin último es eliminar del fluido estándares cercanos a la totalidad de las impurezas existentes. La propuesta de agua repurificada para las ciudades costeras de Baja California Norte expuesta en esta sección está inspirada en el Proyecto de Repurificación del Condado de San Diego; dada la cercanía y las evidentes similitudes geográficas con todo lo que ello implica, el pensar en la adecuación del proyecto a las necesidades y a la realidad de la zona estudiada se justifica claramente. El reto de la ingeniería mexicana es llevar a cabo un desarrollo tecnológico para solventar los rezagos históricos de todos conocidos, pues sólo así podríamos considerar la meta como asequible.

Proceso de tratamiento para agua repurificada

Los tratamientos primario y secundario se proponen por métodos tradicionales: rejillas y tanques de sedimentación. En estas etapas se eliminan gran parte de los sólidos suspendidos del agua residual. Posteriormente se hace necesario un tratamiento terciario, en el que el agua atraviesa filtros de antracita para eliminar los sólidos suspendidos remanentes, y así mismo es clorada para matar a los microorganismos contenidos. Hasta este punto, el agua es segura para prácticamente cualquier uso no potable. Es ahora cuando comienza realmente la repurificación, un proceso de pasos sucesivos de manera cíclica.

Se inicia con un pretratamiento consistente en ultra o micro filtración. Ello se hace para elevar la efectividad de la ósmosis inversa, librando al fluido de residuos sólidos que de otra manera podrían ocluir las membranas, con el mismo fin se ajusta el pH para evitar que una solución en exceso básica o demasiado ácida pueda dañarlas. Desde luego ello implica un eficiente sistema de monitoreo que provea de manera constante las características químicas predominantes en el agua.

El siguiente paso es la ósmosis inversa. El proceso se ha estudiado a detalle en la sección II.1.1, y como se vio se aboca a remover minerales disueltos, tales como las sales, entre otros contaminantes. Trabaja a través de membranas que retienen los elementos no deseados tras hacer pasar el agua a presión a través de ellas.

Posteriormente inicia el proceso que se denomina intercambio iónico. El fundamento del mismo es que aún cuando el nivel de nitratos en el agua sea lo suficientemente bajo para satisfacer los estándares fijados para consumo humano, puede fomentar el crecimiento de algas no deseadas al ser descargada en alguna reserva en un futuro inmediato. Es justamente para evitarlo que se lleva a cabo el intercambio iónico, en el que se polariza el nitrato disuelto en el agua y se retira de ella por lograr los niveles de seguridad deseados.

Por último, se ozoniza el efluente. El ozono funge como desinfectante, tal y como el cloro, que eleva notablemente los niveles de desinfección.

El destino natural del agua repurificada son los embalses superficiales. Ahí se mezcla con el agua dulce ahí contenida y pasa a los procesos de tratamiento convencionales para su distribución entre la población. En el esquema que se muestra a continuación puede observarse el proceso de repurificación de agua.

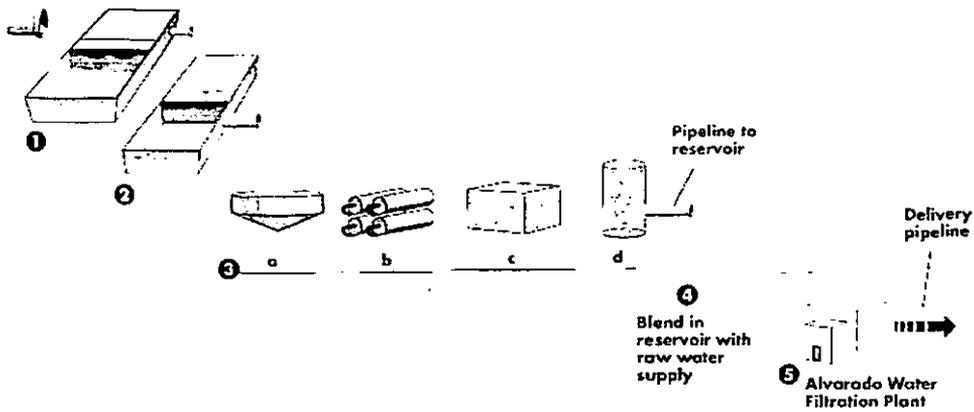
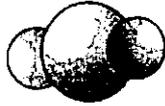


Figura IV.1. Proceso de repurificación de agua

Una de las barreras tradicionales del agua repurificada es su aceptación social. No es una labor sencilla convencer al usuario que aguas que originalmente eran residuales puedan ser posteriormente descargadas en las fuentes de agua potable. Sin embargo está históricamente probado que es un proceso seguro. En distintas regiones de los Estados Unidos, tales como Virginia del Norte y el *Orange County* en California, se ha repurificado agua por varias décadas sin impacto alguno en la salud de la población. Un aspecto medular en el proyecto que se lleva a cabo en el Condado de San Diego es el monitoreo de las condiciones del agua en tiempo real. Así, si alguna parte del proceso llegase a fallar, sería detectado de manera prácticamente inmediata y el agua sería automáticamente desechada.

If a Molecule
of Water



Were the Size of a
Tennis Ball



These Targets of Repurification Would be the Size of:



Figura IV.2. Repurificación; proporciones humanas

La ilustración anterior ilustra cómo el utilizar dispositivos de filtración adecuados, eliminaría del agua todos los agentes contaminantes no deseados. Solamente las moléculas de agua y elementos de diámetros menores a las moléculas de agua podrían "sobrevivir" en el efluente después del sistema de barreras múltiples propio de la repurificación. Este tipo de información es la que difunde la SDCWA para erradicar entre la población de la ciudad de San Diego el rechazo que históricamente ha presentado ante la posibilidad de repurificar aguas residuales para finalmente convertirlas en agua potable.

Por último, es importante mencionar la viabilidad económica del proceso. El proyecto planteado por la SDCWA tiene un costo inicial de 150 millones de dólares, que incluye la construcción y puesta en funcionamiento de una planta de tratamiento avanzado, así como la instalación de las líneas que conducirían al efluente al embalse proyectado. Y lo más representativo es que los costos de operación, o dicho de otra manera, el costo de producción de agua repurificada, son competitivos incluso con las fuentes tradicionales; un metro cúbico de agua repurificada cuesta algo más de cuatro pesos,

mientras que un metro cúbico obtenido por fuentes convencionales, tomando ya en cuenta el largo trayecto que recorre desde el Río Colorado hasta la zona, supera los seis pesos. En cuanto a su viabilidad respecto al agua desalada, es importante decir que los costos de producción serían menores a la tercera parte de lo que cuesta el agua desalada por unidad producida.

Desde luego, el diseño de un sistema de repurificación de agua conlleva implicaciones tecnológicas avanzadas. El diseño de una planta de tratamiento capaz de repurificar agua a través de los procesos descritos en la presente sección es un trabajo con amplias gamas de posibilidades y que requiere de análisis y consideraciones muy minuciosos y que no son propósito de este trabajo de tesis.

IV.3 Ampliación del acueducto Río Colorado – Tijuana

El acueducto Río Colorado – Tijuana es la estructura hidráulica que en la actualidad provee no solamente a la zona en estudio, sino a la totalidad de las poblaciones importantes de Baja California Norte de agua potable. Parte del embalse de la Presa derivadora Morelos, alimentada por el Río Colorado, paralelo a la línea fronteriza y descarga en la presa El Carrizo, desde donde se alimenta a la zona urbana de Tijuana y Playas de Rosarito.

Su gasto medio de operación actual es de $3.3 \text{ m}^3/\text{s}$, si bien la capacidad total de diseño es de $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$. En la actualidad se encuentra en un periodo de modernización y de saneamiento operativo que tienen como objetivo el alcanzar máxima capacidad de operación.

Las figuras IV.2 y IV.3 muestran respectivamente la planta y el perfil del acueducto.

En los últimos años, dadas las precarias condiciones de abastecimiento en la zona en estudio, así como la creciente explosión demográfica prevista para las próximas décadas, la Comisión Nacional del Agua, a través de su gerencia regional en Baja California, ha comenzado a estudiar la posibilidad no solamente de rehabilitar el acueducto actualmente en funciones, sino también la de construir un nuevo acueducto, paralelo al existente, y que satisfaga la demanda de las ciudades de la entidad federativa de cara al año 2015.

Acueducto Río Colorado o Mesa Arenosa – Tijuana

Consiste en la construcción de un acueducto desde el acuífero de Mesa Arenosa o desde la presa Morelos, el cual dejará en ruta los caudales necesarios para abastecer a las ciudades de Mexicali, Tijuana, Playas de Rosarito y Ensenada. Para abastecer a esta última, se construiría el acueducto El Hongo – Ensenada. El acueducto principal podrá tener dos variantes; una por bombeos, con lo cual se aprovecharían el derecho de vía, caminos de operación y sus accesos, así como los túneles existentes del acueducto actual; la otra por la construcción de un túnel, desde la PB4 existente hasta la presa El Carrizo o al Valle de Las Palmas, el cual tendría una longitud de 50 o 60 km. Esta variante representaría un ahorro de energía equivalente a una carga de 670 mca.

La decisión por cualquiera de las dos variantes, será en función de los estudios básicos y anteproyectos que se realicen con mayor detalle del acueducto.

La primera variante del acueducto consta básicamente de la construcción de las obras siguientes:

- Acueducto desde la presa Morelos a Mexicali.
- Acueducto Mexicali a la PB0.
- Tramo PB0 a El Hongo.
- Tramo El Hongo a presa El Carrizo.
- Tramo presa El Carrizo a Tijuana.
- Acueducto para Ensenada de El Hongo a Guadalupe.
- Acueducto para Rosarito desde Tijuana.

La inversión requerida para esta variante de conducción se calcula en 3 756 millones de pesos. Las obras se tienen contempladas para ejecutarse en un periodo de tres años, sin contar el tiempo que se lleve el realizar los proyectos ejecutivos en sus diversos tramos, el cual se estima en un año.

La segunda variante del acueducto consta de la construcción de las obras siguientes:

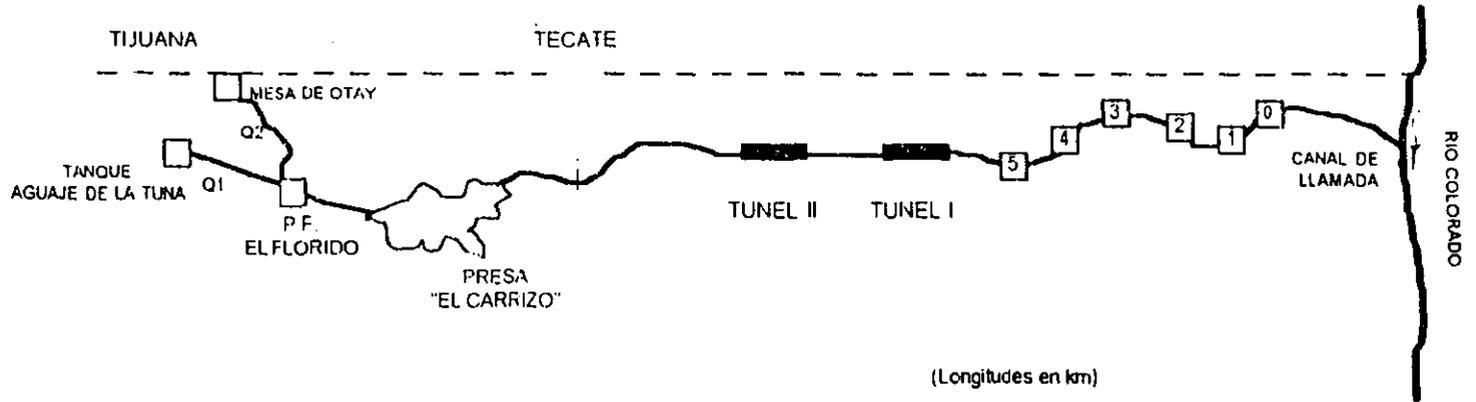
- Acueducto desde la presa Morelos a Mexicali.
- Acueducto Mexicali a la PB0.
- Tramo de la PB0 a la PB4.
- Túnel de la PB4 a la presa El Carrizo o Valle de Las Palmas.
- Adecuación del acueducto para Ensenada de El Hongo a Guadalupe.
- Acueducto para Rosarito desde Tijuana.

La inversión requerida para esta variante es de 4 305 millones de pesos, incluyendo el costo de la elaboración de los proyectos ejecutivos. El periodo estimado para la construcción de la obra es de 4 a 5 años.

Por otra parte, el gobierno del estado e inversionistas norteamericanos promueven la construcción de un acueducto binacional cuyo trazo estaría localizado en México, sin que a la fecha haya más información al respecto.

Las figuras IV.4 y IV.5 muestran croquis de las dos alternativas detalladas anteriormente.

ACUEDUCTO RIO COLORADO-TIJUANA (PLANTA)



Q1 = 1.3 m³/seg

Q2 = 0.9 m³/seg

(Longitudes en km)

Long. canal de llamada	26.5
Long. entre plantas	36.5
Tramo de gravedad	3.1
Long. tunel I	6.9
Long. entre túneles	8.9
Long. tunel II	4.6
Long. tunel II-Presa Carrizo	38.2
Long. Presa Carrizo-P.P. El Florido	13.6
Long. P.P.-Tanque Aguaje la Tuna	19.5
Long. P.P.-Mesa de Otay	12.8

Figura IV.2

ACUEDUCTO RIO COLORADO-TIJUANA (PERFIL)

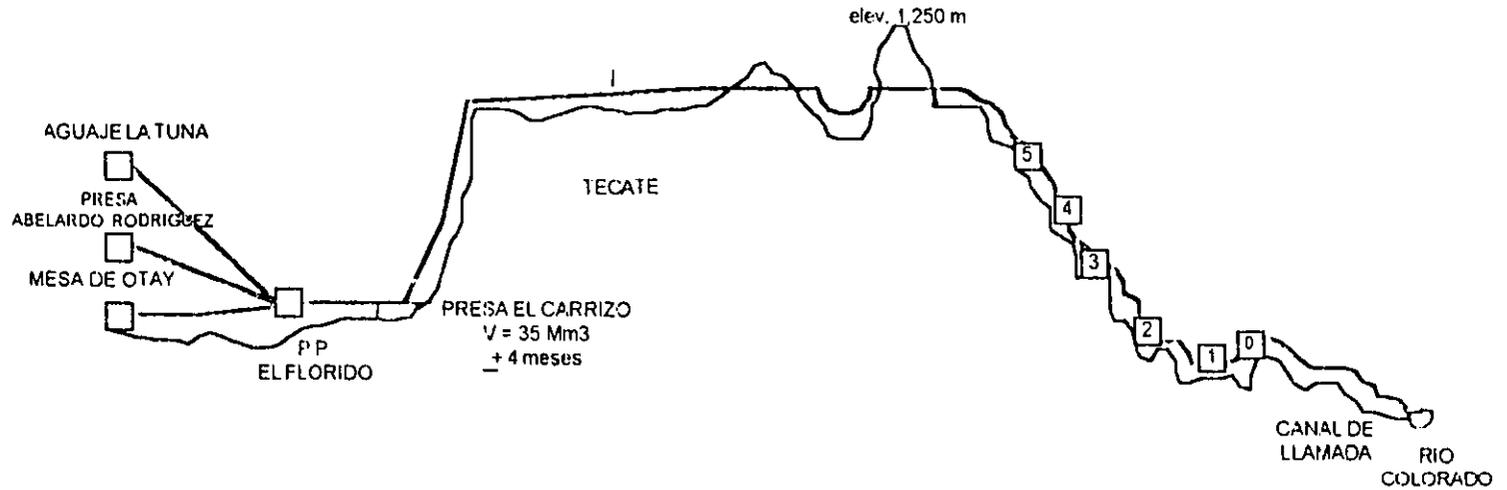


Figura IV.3

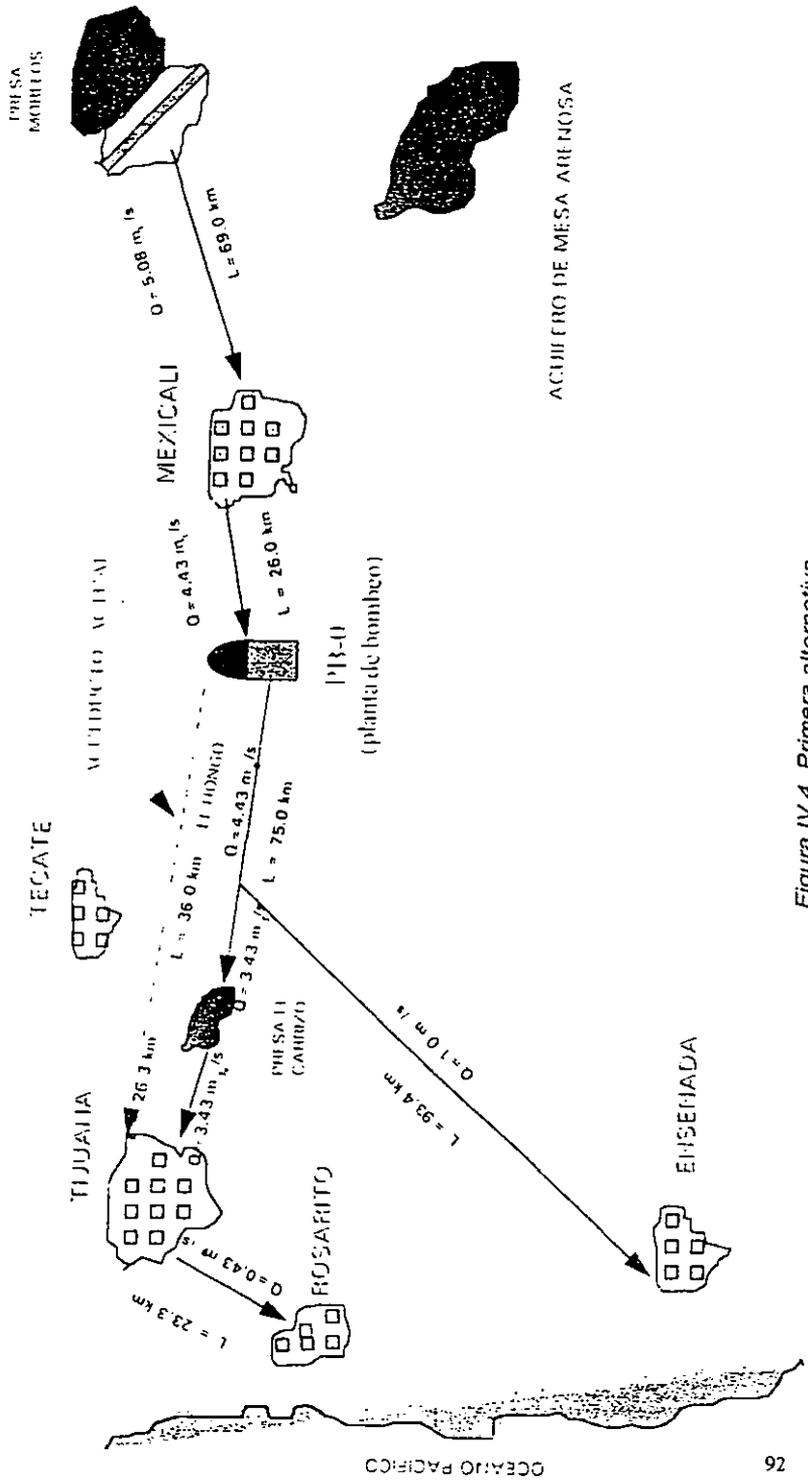


Figura IV.4. Primera alternativa

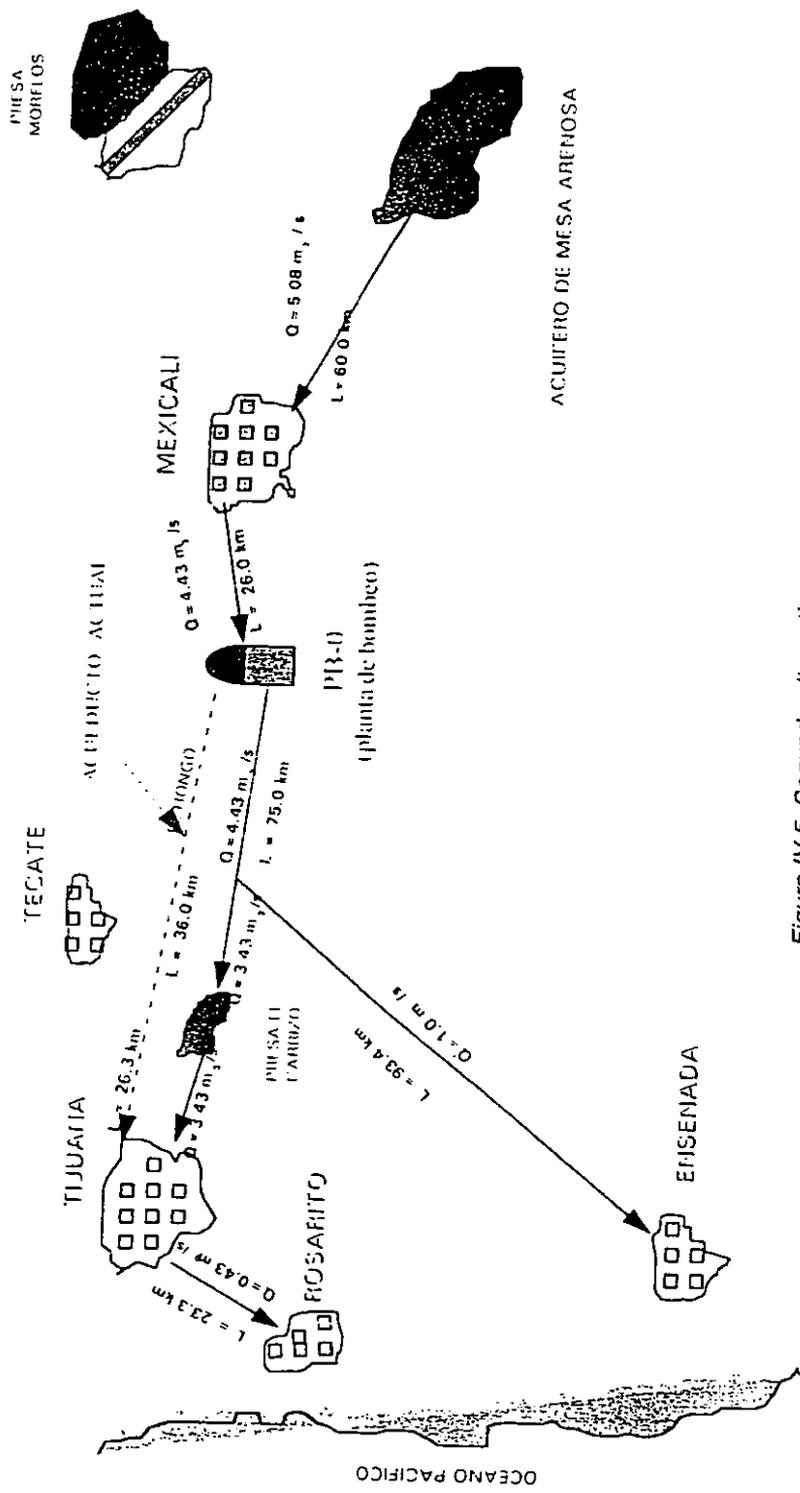


Figura IV.5. Segunda alternativa

IV.3.1 Análisis estructural de tuberías de concreto reforzado con problemas de corrosión.

Durante las inspecciones y estudios preliminares efectuados en el primer semestre de 1996 en las tuberías de concreto reforzado instaladas en la zona de gravedad del acueducto Río Colorado – Tijuana, se detectaron diversos tipos de fallas, las cuales aunadas a la falta de sistemas de protección anticorrosiva, representan un peligro potencial para el funcionamiento del acueducto.

Con el fin de determinar con precisión la necesidad de aplicar un sistema de protección catódica a la tubería en cuestión, fue necesario llevar a cabo un estudio detallado del origen del fenómeno de corrosión en el acero de refuerzo del concreto de la tubería. De esta manera el Laboratorio de Corrosión del Departamento de Protección Catódica del acueducto decidió llevar a cabo un convenio de colaboración con el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Guadalajara y la Universidad de Guadalajara, para de esta manera y optimizando los recursos de las distintas instituciones poder realizar los estudios y análisis de alto nivel que eran requeridos.

El concreto reforzado es un material compuesto de concreto y una estructura de acero, unidos de tal manera que forman un sólido único, ya que el comportamiento mecánico que presenta aprovecha las propiedades de resistencia a la compresión y a la tensión respectivos de los materiales que lo componen.

En ausencia de ciertas especies y agentes dañinos, el ambiente proporcionado al acero de refuerzo por el concreto es la mayoría de las veces el recomendable para prevenir su corrosión. Un concreto de alta calidad, propiamente vaciado, consolidado y curado, provee al acero de una coraza altamente alcalina y de baja permeabilidad. Sin embargo, la presencia de humedad, electrolitos y oxígeno, los cuales pueden penetrar mediante procesos de difusión a través de pequeñas fracturas en el concreto, pueden destruir el ambiente pasivo y establecer celdas localizadas de corrosión que conforme transcurra el tiempo destruirán el concreto por efecto de fuerzas expansivas creadas por el proceso de corrosión del acero.

En el caso de tuberías de concreto reforzado utilizadas para la conducción de agua cruda, la alcalinidad se puede ver disminuida por el efecto de sustancias ácidas como el

dióxido de carbono (CO₂). Por otro lado, la presencia de iones cloruro (Cl⁻) puede promover el proceso de corrosión localizada del acero aún cuando la alcalinidad se mantenga alta.

El proceso de corrosión que ocurre en el acero de refuerzo en estructuras de concreto no es fácil de describir, es un proceso extremadamente complicado debido a que aún en las situaciones más simples siempre está asociado a numerosos factores que tienen una fuerte influencia en dicho proceso. Estos factores tienen relación con el concreto, ya sea por un tipo de materiales utilizados o por procedimientos mismos de construcción, el acero de refuerzo utilizado o por los factores ambientales del lugar donde el concreto reforzado es construido o instalado. En la tabla que se incluye a continuación, se muestra una lista clasificada de los factores que influyen en el proceso de corrosión (ÁVILA, J. Y col., *Corrosión*, Vol. 1, junio de 1988, No.1, pp. 11-15).

Tabla IV.1. Factores que influyen en el proceso de corrosión

Concreto	Refuerzo metálico	Medio ambiente
<u>Materiales</u> <ul style="list-style-type: none"> • Tipo de cemento • Tipo de agregado • Tipo de agua • Aditivos 	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de acero • Morfología • Tensión del acero • Condición superficial del refuerzo 	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad relativa • Ataque químico por cloruros, sulfatos, oxígeno y dióxido de carbono.
<u>Construcción</u> <ul style="list-style-type: none"> • Relación agua/cemento • Relación cemento/arena • Condiciones de curado 		

Obviamente, pueden existir otros factores como errores de diseño, otras especies químicas agresivas, etc., pero lo importante en cada caso será el poder plantear los factores más importantes que lleven a realizar el estudio adecuado que nos permita conocer el proceso de corrosión en particular.

A continuación se muestran imágenes tomadas en el tramo mencionado del acueducto Río Colorado – Tijuana, en las que pueden apreciarse los efectos causados en el acero de refuerzo por el ataque corrosivo.



Figura IV.6



Figura IV.7

En la primera imagen se aprecia la superficie del concreto fracturada por efecto de fuerzas expansivas de los productos de corrosión en el acero de refuerzo fuertemente corroído. En la segunda, se muestra el estado del acero de refuerzo corroído y la pérdida de consistencia mecánica del mismo.

Procesos de falla

Los mecanismos de falla de una tubería atacada por corrosión pueden ser de distinta índole. Dentro de los más comunes podemos mencionar a la pérdida de resistencia mecánica del acero de refuerzo, lo cual redundará en una redistribución de esfuerzos que puede llevar al acero adyacente a fallas frágiles. La falla del acero, que es el elemento estructural primario de la tubería, puede llevar a fallas catastróficas de la misma. En el caso de tuberías de concreto presforzado, el acero es aplicado al manto de concreto a esfuerzos que fluctúan entre 70 y 75% de la resistencia última a tensión del refuerzo, por lo que el rango de seguridad que pudiera resistir la disminución de su resistencia mecánica es más bien bajo. Una disminución de entre 20 y 30% del diámetro del cable de acero debida a efectos corrosivos resultará indudablemente en la falla del mismo.

Al tiempo que ocurre una corrosión y la falla localizada de cables individuales de refuerzo, los esfuerzos son redistribuidos a los cables adyacentes. Así como los efectos corrosivos pueden extenderse a estos últimos, también pueden ocurrir fallas en ellos por sobrecarga; de esta manera, la disminución de la resistencia mecánica de una cantidad limitada de cables por corrosión puede resultar en un serio debilitamiento de un área más extensa de la tubería, en la que la capacidad de carga se vuelve muy cuestionable.

Se pueden identificar dos distintos escenarios. Primero, si la presión de operación resulta mayor a la resistencia del acero adelgazado dentro del manto de concreto, la tubería tendrá una falla frágil y catastrófica. Segundo, si la presión interior de la conducción aún no supera la resistencia de la zona debilitada, el cilindro se deformará causando daños al recubrimiento de concreto, así como el rompimiento de más cables del acero de refuerzo. Eventualmente, si el problema no es corregido, los efectos corrosivos conducirán a la falla del primer escenario.

Reparación y prevención

La corrosión es básicamente un proceso electroquímico en el que deben estar presentes cuatro condiciones.

1. Debe haber una zona positiva o anódica (ánodo).
2. Debe haber un área negativa o catódica (cátodo).
3. Debe establecerse una línea de corriente de origen iónico, o electrodiálisis.
4. Debe establecerse una línea de flujo electrónico de corriente.

El potencial eléctrico entre el ánodo y el cátodo causa el flujo de corriente. El ánodo es el área que sufre pérdida de material metálico por ende corrosión. La cantidad de metal que será removido es directamente proporcional a la intensidad del flujo de corriente. Por ejemplo, un ampere de corriente directa que fluye a través del suelo en el que se encuentra enterrada una estructura metálica tal como una tubería de concreto reforzado, puede remover aproximadamente 10 kilogramos de acero en un año. Este índice varía según el tipo de metal; es claro que las intensidades de corriente corrosiva normalmente encontradas son mucho menores, se miden normalmente en miliamperes. Si una de las cuatro condiciones mencionadas previamente puede ser eliminada, el proceso de corrosión y la consecuente pérdida de metal pueden ser prevenidas. La protección catódica, uno de los métodos más comunes de mitigación corrosiva en tuberías y tanques almacenadores, mitiga la corrosión eliminando las áreas anódicas en una estructura metálica subterránea.

La protección catódica se lleva a cabo a través de uno de dos métodos. El primero sería utilizar un metal "de sacrificio" (con una fuerza electromotiva natural mayor que la del acero), conectando un cable conductor a la estructura susceptible de ser protegida. El magnesio es un ánodo galvánico muy común. Este tipo de protección galvánica catódica se basa en el potencial eléctrico natural entre los dos metales, que provoca el flujo de la corriente catódica protectora. Como el voltaje establecido está limitado por la pequeña diferencia de potencial existente entre los metales, y el flujo de corriente es relativamente bajo, este tipo de protección catódica esté normalmente asociado con estructuras o muy pequeñas, o bien muy bien protegidas.

Como segundo tipo de protección, dentro de los más comunes, se puede mencionar a la protección catódica por corriente inducida. Se trata de una fuente de corriente directa

externa, tal como un transformador o una batería. Un material anódico se coloca en el electrolito junto con la estructura que va a ser protegida, y se hace "más positivo" que la estructura misma al conectar ambos, ánodo y estructura, a la fuente de corriente directa. Cualesquiera materiales conductores pueden ser utilizados como ánodo de corriente inducida, pero como la corrosión ataca justamente al ánodo, los materiales con índices de consumo muy bajos son los más deseables.

En lo que se refiere a la reparación de tuberías que han sido ya dañadas, perdiendo con ello parte de sus propiedades mecánicas, una de las alternativas más diversificadas es la colocación de tensores en las zonas afectadas, rodeando a la tubería en toda su circunferencia. Se trata de cables de acero cubiertos por un inhibidor corrosivo y forrados con un recubrimiento plástico que los aísla efectivamente de la humedad y los agentes químicos. Dado su bajo coeficiente de fricción y las altas propiedades de transmisividad de fuerzas, el presfuerzo es eficientemente transmitido en toda la circunferencia de la tubería. El siguiente esquema muestra la distribución de esfuerzos tras la colocación de los tensores.

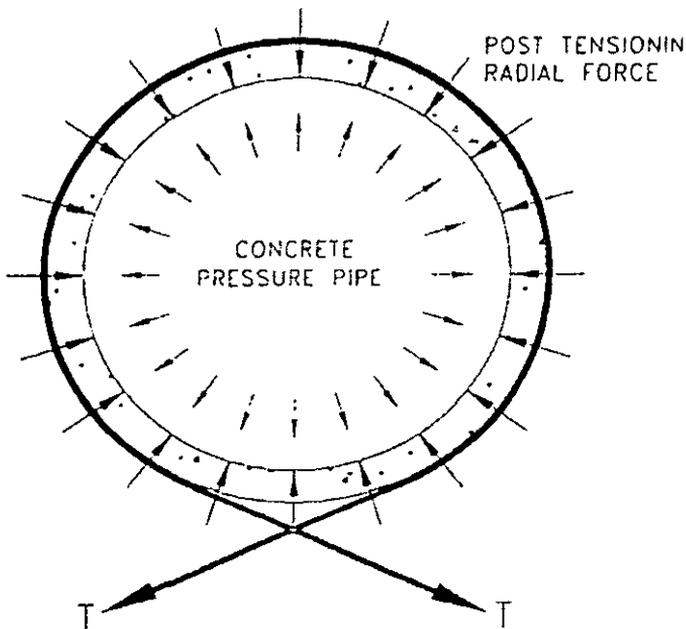


Figura IV.8. Distribución de esfuerzos en tuberías con tensores

CAPÍTULO V.

ACUERDOS BINACIONALES.

COOPERACIÓN CON EL CONDADO DE SAN DIEGO.

Plan 2100

El Plan 2100 es una estrategia planeada por la Autoridad del Agua del Condado de San Diego (*San Diego County Water Authority, SDCWA*) para asegurar el abastecimiento de agua en aquella región de cara al siglo XXI. Es importante señalar que las condiciones geográficas predominantes en el Condado de San Diego son similares a las de la región en estudio en este trabajo de tesis. La aridez y las escasas precipitaciones obligan a la ciudad de San Diego y sus inmediaciones, de manera similar a lo que ocurre con las ciudades costeras de Baja California Norte, a traer agua desde regiones lejanas. La principal fuente de abastecimiento es, de manera paralela, el Río Colorado. La zona de la que se toma el agua se denomina Distrito de Irrigación Imperial (*Imperial Irrigation District, IID*). El estudio de factibilidad ingenieril en su conjunto busca evaluar la posibilidad de llevar a cabo un programa de inversiones encaminadas a transferir agua proveniente del Río Colorado a la SDCWA..

Descripción del proyecto

La ampliación de la red actual comprende 5 grandes líneas de transporte de agua (*corridors*), que incluyen diversas estructuras hidráulicas. A continuación se hará una breve descripción de cada una de ellas, con la nomenclatura empleada por la SDCWA.

- Corredor 1A.
Parte del Lago Havasu y descarga en el Lago Skinner. Se trata de 240 millas de túneles, canales, tuberías y sifones.
- Corredor 3A.
171 millas partiendo de la descarga número 1 del *All American Canal (drop no.1)*, pasando por el cañón *Moosa* hasta descargar en el Primer Acueducto de San Diego (*1st San Diego Aqueduct*).

- Corredor 3B.

A partir del mismo punto, es en gran parte de su recorrido paralelo al 3ª, la descarga final es en la presa *San Vicente*, en donde se proyecta aprovechar la infraestructura de bombeo existente para impulsar el agua hacia el Segundo Acueducto de San Diego (2º *San Diego Aqueduct*). Su longitud total es de 173 millas.

- Corredor 5A.

Parte también de la *drop no. 1*, atraviesa el cañón *Chocolate*, al sur de la represa *El Capitan*, y al igual que el 3B, descargaría en la presa *San Vicente*, después de 140 millas de recorrido, con disposición final en el Segundo Acueducto de San Diego.

- Corredor 5C.

Inicia también en la descarga número 1 del *All American Canal*, y es paralelo al mismo hasta el final. Tiene 150 millas de longitud y descarga en el Segundo Acueducto de San Diego.

Como Anexo C, se anexa un plano de la zona comprendida entre la ciudad de San Diego y el IID, en el que se marcan las estructuras hidráulicas existentes, así como las proyectadas.

Existe asimismo el proyecto de conectar la descarga número 1 del *All American Canal* al Río Colorado, a través de un acueducto de 36 millas.

Tratamiento del agua

Se contemplan dos alternativas para otorgarle al agua conducida la calidad que se requiere. Una de ellas es tratarla en el Distrito Imperial (*West Side Alternative*) y la otra en el Condado de San Diego (*East Side Alternative*). En particular esta última resulta más económica, pues pueden aprovecharse las instalaciones existentes (plantas de tratamiento de agua *Miramar* y *Alvarado*). La calidad deseada a alcanzar ronda los 500 mg/l.

En cuanto a la desalación, para los corredores 3A, 3B, 5A y 5C, el 13.3% del volumen conducido resultará en concentrado salino de desecho (*brine*); para el 1A, el 9.3%. La diferencia se debe a las distintas concentraciones de sólidos inorgánicos en las fuentes

de los corredores. Mientras que en la presa Parker es de 747 mg/l, en la presa Imperial es de 879 mg/l.

Tabla V.1. Volúmenes totales, de desecho y aprovechables por corredor

Corredor	Volumen transferido (acre-pie por año)	Volumen de desecho (acre-pie por año)	Volumen utilizable (acre-pie por año)
1AA etapa 1	200 000	18 600	181 400
1AA etapa 2	300 000	27 900	272 100
3A, 3B, 5A, 5C	300 000	39 900	260 100
3A, 3B, 5A, 5C	400 000	53 200	346 800
3A, 3B, 5A, 5C	500 000	66 500	433 500

Se optó por dejar los volúmenes en términos de las unidades empleadas por la SDCWA. Para mejor comprensión, 500000 acre-pie por año equivalen a 19.5 m³/s; 200000 acre-pie/año a 7.8 m³/s. Los distintos volúmenes de transferencia para los corredores 3A, 3B, 5A y 5C obedecen a distintas alternativas de capacidad estudiadas. Se consideran también 3 distintas alternativas de disposición de lodos: en el Río San Diego, en las alcantarillas locales y el bombeo desde la planta de tratamiento Miramar hacia la *South Bay Outfall*.

Diseño

La ampliación de la red se ha proyectado en dos etapas. La primera es la expansión del acueducto del Río Colorado, la segunda el nuevo sistema paralelo.

Tabla V.2. Diseño Hidráulico

Volumen de transferencia (acre-pie/año)	Capacidad hidráulica de diseño (m ³ /s)	Diámetro de la tubería (pulgadas)
300 000	12.9	96
400 000	17.2	108
500 000	21.5	120

A continuación se listan los conceptos que se consideran en el diseño del proyecto.

- Trazo y nivelación para canales, tuberías, túneles y sifones. Todo ello basado en consideraciones de uso de suelo, geología, topografía y construcción de caminos de acceso.
- Condiciones de estado estacionario hidráulico y análisis preliminar de fenómenos transitorios.
- Excavación de túneles, métodos de excavación mecánica, costos por periodos de inactividad y tarifas por avance en túneles.
- Facilidades de apoyo terrestre (caminos, campamentos, etc.).
- Estabilización de terreno.
- Requerimientos de aguas subterráneas, y posibles impactos ambientales.
- Rellenos y depósito de material producto de excavación.

Otras obras de infraestructura proyectadas son plantas generadoras, estructuras de control de presión y líneas de transmisión eléctrica, así como 20 nuevas plantas de bombeo.

En cuanto al almacenamiento de agua, se proyecta la ampliación de la presa San Vicente, en la que descargan los corredores 3B, 5A y 5C. Podrá almacenar 82.6×10^9 m³, con un costo de ampliación de U\$D 131 200 000. Para los corredores 1A y 3A se constrirá una presa en el Cañón Moosa, con una capacidad de 83.9×10^6 m³ y un costo aproximado de U\$D 294.5 millones.

El resumen de los conceptos considerados en la elaboración del presupuesto de proyecto se exhibe a continuación.

- Canales
- Tuberías
- Túneles
- Plantas de bombeo
- Plantas generadoras y estructuras de control de presión
- Líneas de transmisión eléctrica
- Mitigación de impactos ambientales
- Facilidades de tratamiento de aguas

- Costos indirectos
- Costos anuales estimados incluyendo:
 - Energía consumida por la impulsión
 - Operación, mantenimiento y reemplazo de partes
 - Recuperación de energía
 - Tratamiento de agua

Los factores de seguridad considerados varían de concepto en concepto según su naturaleza, y fluctúan en un rango entre 15 y 50%.

Tabla V.3. Resumen de costos estimados

Concepto	Volumen anual transferido			
	200 000 AF (U\$D x1000)	300 000 AF (U\$D x1000)	400 000 AF (U\$D x1000)	500 000 AF (U\$D x1000)
Costos de inversión totales				
Corredor 1A (etapa 1)	889 711			
Corredor 1A (etapa 2)		2 742 154		
Corredor 3ª		1 981 309	2 124 110	2 276 204
Corredor 3B		1 520 756	1 716 415	1 913 912
Corredor 5A		1 594 460	1 718 194	1 846 389
Corredor 5C		1 360 849	1 566 055	1 836 622
Costos totales anuales estimados				
Corredor 1A (etapa 1)	21 988			
Corredor 1A (etapa 2)		35 097		
Corredor 3A		42 985	56 695	70 375
Corredor 3B		54 086	70 652	87 218
Corredor 5A		45 088	59 458	73 831
Corredor 5C		56 724	74 172	91 623

Nuevamente se consideran distintas alternativas de capacidad total de bombeo para cuatro de los corredores, mientras que para el Corredor 1A sólo se plantea una alternativa en cada una de sus etapas.

Tabla V.4. Resumen de tratamiento de aguas. Corredor 1A.

Tabla V.4. Resumen de tratamiento de aguas. Corredor 1A.

Concepto	Etapa 1	Etapa 2
Volumen anual	200 000 AF	300 000 AF
SDT en efluente	500 mg/l	500 mg/l
Volumen aprovechable	181 400 AF	272 100 AF
Costos de inversión totales	U\$D 103 398	U\$D 155 097
Costos anuales de operación	U\$D 8 834	U\$D 13 251

* Costos en miles de dólares

Tabla V.5. Resumen de tratamiento de aguas. Corredor 3A, 3B, 5A y 5C

Concepto	300 000 AF	400 000 AF	500 000 AF
SDT en efluente	500 mg/l	500 mg/l	500 mg/l
Volumen aprovechable	260 100 AF	346 800 AF	433 500 AF
Costos de inversión totales	U\$D 197 400	U\$ 263 200	U\$D 329 000
Costos anuales de operación	U\$D 18 100	U\$D 24 100	U\$D 30 100

* Costos en miles de dólares

En lo referente a la posible conexión del *drop no.1* del *All American Canal* con el Río Colorado, los costos estimados en función de la capacidad de transferencia anual se resumen a:

<u>Volumen anual transferido</u>	<u>Costo estimado por ampliación</u>
300 000 AF	U\$D 51 274 000
400 000 AF	U\$D 54 033 000
500 000 AF	U\$D 56 586 000

A continuación se muestra una gráfica en la que se registra la demanda de agua potable del condado de San Diego para los primeros lustros del próximo siglo. Los datos provienen de la SDCWA. Es de hacer notar que a partir de 1995 la demanda se redujo drásticamente dados los programas de ahorro de aguas de la entidad, y con los nuevos acuerdos de abastecimiento (de los cuales forma parte el plan 2100) se pretende la regularización en la demanda.

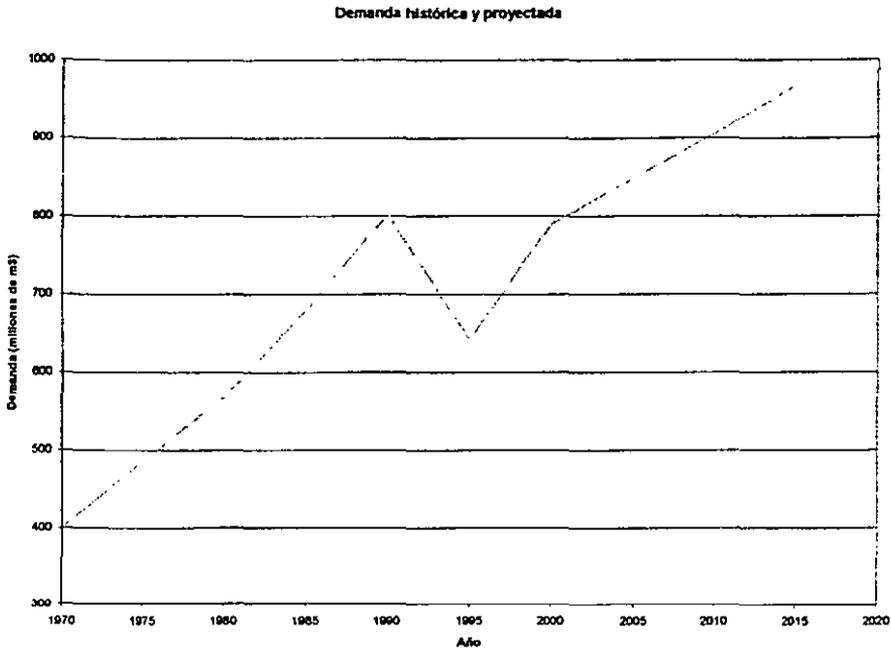


Figura V.1

Los datos muestran que la aplicación del plan 2100 (descrito en las páginas anteriores) satisfaría con cierta holgura las necesidades a corto plazo de agua para la región del condado de San Diego, más aún tomando en cuenta los nuevos programas de agua recuperada y repurificada, así como los acuerdos con el sistema de abastecimiento del estado de California (MWD). Todo ello indica que es al menos razonable el indagar en las posibilidades de acuerdos binacionales de cooperación, sobre todo cuando es evidente que la infraestructura existente en cuanto al abastecimiento de las ciudades en estudio es insuficiente.

Aunque se anticipa que la demanda de agua recuperada en Tijuana debe ser grande, aún no se ha iniciado estudio alguno para cuantificar esta demanda. Las dependencias mexicanas responsables de asuntos relacionados con agua potable y aguas residuales, tales como la CESPT, CNA y SAHOPE no están considerando actualmente ningún plan relacionado con la recuperación de agua. Tales planes deben integrarse a las recomendaciones que vinieron después de la conferencia *Retos y Oportunidades Binacionales en Materia de Agua*.

El Consejo Fronterizo de Aguas, creado después de la conferencia binacional, constituye un foro apropiado para realizar los estudios necesarios. Además, el Departamento Metropolitano de Aguas Residuales de San Diego (MWWWD) ha iniciado la elaboración de un Plan Maestro para Recursos Acuáticos en la Frontera de las Californias. Este plan serviría de vehículo para identificar las estrategias binacionales para llevar a cabo un plan integrado en la administración de recursos acuáticos de las cuencas de Tijuana, Otay y Sweetwater hasta el año 2020 y posiblemente más allá. El suministro de agua, el tratamiento y uso de aguas residuales y el empleo de mantos acuíferos figuran entre las necesidades que tendrán que valorarse para desarrollar un programa equilibrado a un costo razonable e institucional y políticamente estable.

Se reconoce que el Plan Maestro requerirá la participación y soporte económico por parte de agencias federales, estatales y locales para obtener la amplia gama de análisis, conclusiones y recomendaciones específicas al Consejo Fronterizo de Aguas referentes a la implementación potencial del Plan Maestro.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES.

1 La situación de abastecimiento de agua potable de las ciudades costeras de Baja California Norte es alarmante. Las fuentes disponibles a la fecha serán completamente insuficientes en los próximos años. Se trata de una zona clave en el tránsito transfronterizo México – Estados Unidos, lo que hace, en particular de la ciudad de Tijuana, un punto de confluencia de capitales y de movimiento social. Ello se ha visto reflejado en las tendencias demográficas de los últimos años. El crecimiento poblacional de la última década indica que, para esta población en particular, esa tendencia se acrecentará geoméricamente al transcurrir del tiempo. Los índices actuales de crecimiento son los más altos del país, aún considerando ciudades como México, Guadalajara o Monterrey.

2 Las fuentes de abastecimiento, dadas las condiciones geográficas de la región, son precarias y en lo que se refiere a corrientes y cuerpos de agua naturales, prácticamente inexistentes. El agua obtenida en el sistema de pozos no constituye una solución real, dada la pobreza de acuíferos de agua dulce. La cercanía con el océano provoca la contaminación por intrusión salina de los cuerpos de agua subterránea, cuyo tratamiento no es trivial.

Tijuana y Ensenada se abastecen hoy en día casi en su totalidad a través del acueducto Río Colorado – Tijuana. Por años éste se ha constituido en la fuente primaria de abastecimiento, y eventualmente en la solución a los problemas de abastecimiento de la región costera del estado. Sin embargo, los volúmenes suministrados actualmente serán insuficientes sin duda alguna a muy corto plazo. La situación es tan alarmante como que de no cambiar la infraestructura hidráulica, Tijuana tendría para el año 2010 un gasto deficitario de más de $4\text{m}^3/\text{s}$, es decir, una cantidad similar a la que se suministra en la actualidad. En resumidas cuentas, Tijuana debe aumentar en los próximos diez años su capacidad de producción de agua potable en un 100%. Para Ensenada los

volúmenes deficitarios no son tan espectaculares, pues se trata de una población de dimensiones menores, pero aún así deberá aumentar su producción en proporciones cercanas al 50%.

En este contexto, es casi una consecuencia lógica pensar en la desalación de agua marina o salobre como alternativa de abastecimiento de agua potable. Es al menos contradictorio sufrir de condiciones precarias de agua cuando se tiene una fuente inagotable justamente frente a los ojos.

3 La razón por la que, no solamente en Baja California Norte o en nuestro país sino en todo el mundo, no se ha generalizado la desalación de agua marina es muy sencilla: es muy cara. El desarrollo tecnológico ha arrojado distintas técnicas de desalación, algunas de las cuales se han estudiado a lo largo de este trabajo de tesis. Se entiende por desalación la remoción de sales inorgánicas a través de algún proceso de tratamiento de agua; y en ese contexto ya ha sido ampliamente utilizado en innumerables procesos industriales. Sin embargo, el pensar en la desalación como alternativa real de producción de agua potable es un paso que nos ha costado mucho trabajo dar.

Las técnicas estudiadas son la ósmosis inversa, la destilación solar y la electrodiálisis. En distintas medidas, las tres han sido ya utilizadas en distintos ámbitos. La destilación solar, por ejemplo, ha sido práctica común durante siglos en muchas poblaciones. Es una alternativa natural e inmediata para poblaciones en zonas áridas y cercanas a los cuerpos oceánicos, como lo es la región en estudio. Sin embargo, la producción que puede llegar a alcanzarse está muy lejos de constituir una solución, dados los volúmenes deficitarios que se presentarán en el corto plazo. Esta alternativa es ideal para pequeñas comunidades, rurales o pesqueras, cuya consecución de agua potable llegue a ser precaria, y en las que se tengan grandes extensiones disponibles para captar las radiaciones solares. Es indudable que la energía solar deberá tomar en las próximas décadas un papel fundamental de cara al desarrollo sustentable, que debe convertirse de cara al nuevo siglo en una política prioritaria en todos los ámbitos. Sin embargo, el desarrollo tecnológico no nos ha llevado al punto en el que se pueda pensar en el

cabal aprovechamiento de ese inagotable recurso. Y este tema rebasa ampliamente el ámbito de la producción de agua potable, deberá desarrollarse ampliamente en cada uno de los sectores con implicaciones energéticas de la actividad humana a nivel mundial.

El desarrollo de este trabajo de tesis condujo a la elección de la ósmosis inversa como la técnica idónea de cara al análisis de factibilidad de la desalación como alternativa de abastecimiento de agua para la región en estudio. Ello se concluyó dada la flexibilidad que presenta la técnica en cuanto al nivel de contaminantes inorgánicos que es capaz de remover. El caso particular de la electrodiálisis es muy claro: solamente se pueden tratar aguas con niveles salinos moderados con una concentración de hasta 5000 mg/l, lo cual excluye no solamente al agua marina (36 000 mg/l), sino a una amplia gama de aguas salobres, las cuales alcanzan en condiciones no extremas los 10 000 mg/l. De esta manera, y pensando en una tecnología que flexibilice y amplíe al máximo las posibilidades, la ósmosis inversa es sin duda la opción más viable. Ello se ve respaldado por el hecho de ser la técnica más ampliamente utilizada en todo el mundo. Las plantas con producciones importantes de agua potable son casi en su totalidad de ósmosis inversa, siendo el caso más claro el de la planta desaladora de Yuma, la más grande del mundo en cuanto a volumen se refiere; su producción es de $4\text{m}^3/\text{s}$.

4 Sin duda la pregunta a la que es más importante responder en este trabajo se da en cuanto a la viabilidad económica de la desalación en la zona en estudio. Para ello hay un factor de gran importancia que debe tomarse en cuenta. Los costos convencionales de producción de agua dejan en casi todos los casos de lado a la desalación, que en ocasiones llega a ser diez veces más cara que los métodos tradicionales. Pero el caso particular de la zona que nos ocupa difiere de los índices considerados como normales. Producir un metro cúbico de agua potable en la zona costera de Baja California Norte cuesta alrededor de \$6.50, al menos el doble de lo que costaría en zonas con recursos hidrológicos estables, y ese factor se multiplica por sí mismo en regiones con recursos abundantes. Ello se

debe a que casi la totalidad del agua que se consume en la zona es "importada", en el sentido de que proviene de regiones muy lejanas, y los elevados costos de la conducción convergen en ese dato revelador. Esto hace que se justifique ampliamente el análisis planteado en cuanto a la desalación. Es una opción que, dadas las condiciones de la zona, no puede descartarse.

El desarrollo de este trabajo indica que el factor que incide mayormente en el nivel de los costos de producción de agua a través de la desalación es el nivel de contaminantes inorgánicos que posea el agua con la que es alimentado. El análisis realizado en el Capítulo III indica que, si bien el pensar en la desalación de agua marina como tal parece fácilmente descartable dado el nivel de los costos que implicaría, no ocurre lo mismo al variar la fuente de alimentación.

Tabla VI.1

Fuente de alimentación	Costo de producción por m ³
Agua salobre	\$ 4.62
Agua repurificada	\$ 5.67
Agua marina	\$ 8.10

Los datos obtenidos indican que dos de estos costos están por debajo de los que se alcanzan en la actualidad con el sistema de producción vigente en la región. Esto quiere decir que la posibilidad de desalar agua no solamente implica los beneficios del desarrollo tecnológico, sino que además resulta una opción rentable que podría incluso abatir los costos que se tienen hoy en día.

Es relativamente claro que el desalar agua marina no puede justificarse dado el elevado nivel de costos, pero el pensar en agua salobre o repurificada como alternativa es sumamente atractivo.

Desde luego, en el balance final deberán entrar en consideración otros factores, como lo son las complicaciones tecnológicas, la inversión inicial, el esquema de financiamiento, los costos operativos, las estrategias de amortización y todas las implicaciones ingenieriles y económicas que de la posibilidad de construir una planta de esta índole se derivasen. Desde luego, eso será motivo de un análisis más exhaustivo, que implica consideraciones muy específicas, lo cual rebasa por mucho el ámbito de este trabajo.

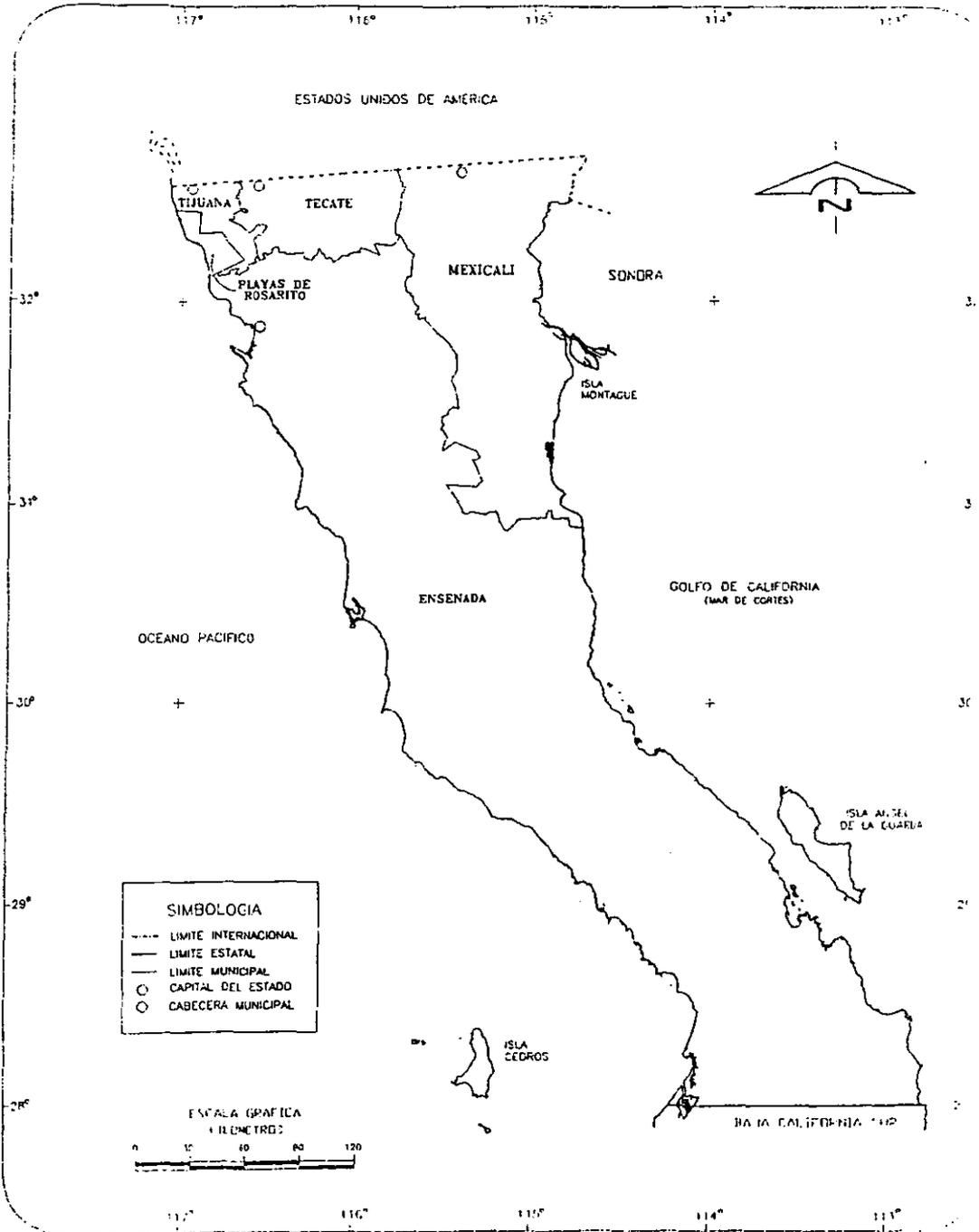
5 Es también muy importante hacer notar que, más allá de la desalación, es muy claro que las políticas de consecución y aprovechamiento de agua deben ubicarse de manera cada vez más contundente en un marco extremadamente claro y bien identificado: recuperación y repurificación. Y ello no solamente se refiere a la zona en estudio, debe convertirse en una política nacional en cuanto al mejor aprovechamiento del recurso. En la medida que seamos capaces de captar de manera más eficiente nuestras aguas de desecho, y que del mismo modo podamos llevarlas a niveles de tratamiento que puedan hacer que sean consideradas como aprovechables, estaremos en el camino de resolver en gran medida los problemas de abastecimiento de agua en muchas regiones que sufren de escasez.

6 Si bien es cierto que el tratar aguas residuales para llevarlas a niveles en los que puedan ser aprovechadas con fines agrícolas, de riego o industriales no es novedosa, también lo es que en la actualidad se están desarrollando nuevas técnicas que permiten pensar en potabilizar aguas residuales. Como ejemplo muy claro pueden señalarse los esfuerzos que se hacen actualmente en la ciudad de San Diego, California. Esta población presenta características geográficas muy similares a la zona en estudio, y las autoridades de aquél condado en lo que a agua se refiere, han desarrollado extensas campañas con el fin último de justificar la repurificación de agua como la única alternativa para resolver los problemas de abastecimiento de la ciudad. Así, el agua repurificada debe ser considerada como la alternativa primaria para resolver en el corto plazo las deficiencias de zonas como la que nos compete. Y en el proceso de repurificar el agua, la desalación por ósmosis inversa juega un papel medular.

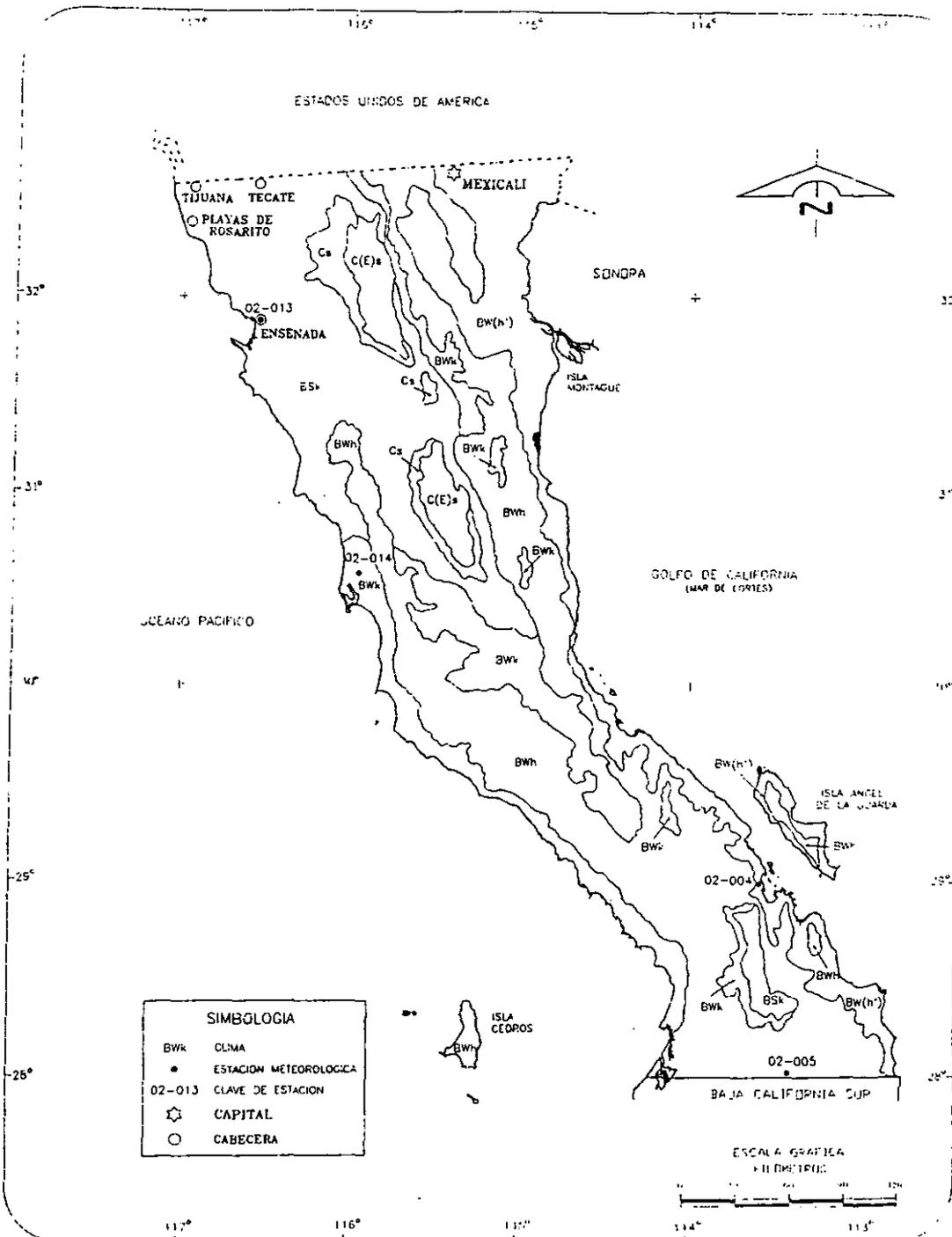
Por último, cabe destacar que los resultados de este trabajo de tesis serán entregados a la CNA, y que lo que aquí se ha concluido concuerda en gran medida con las tendencias que la Comisión ha venido identificando en los últimos años: la desalación y la repurificación de agua serán en un futuro cercano, para la zona en estudio en particular y para nuestro país en general, las piedras angulares que permitan solventar los problemas de abastecimiento de agua potable.

ANEXO A

División Geoestadística Municipal

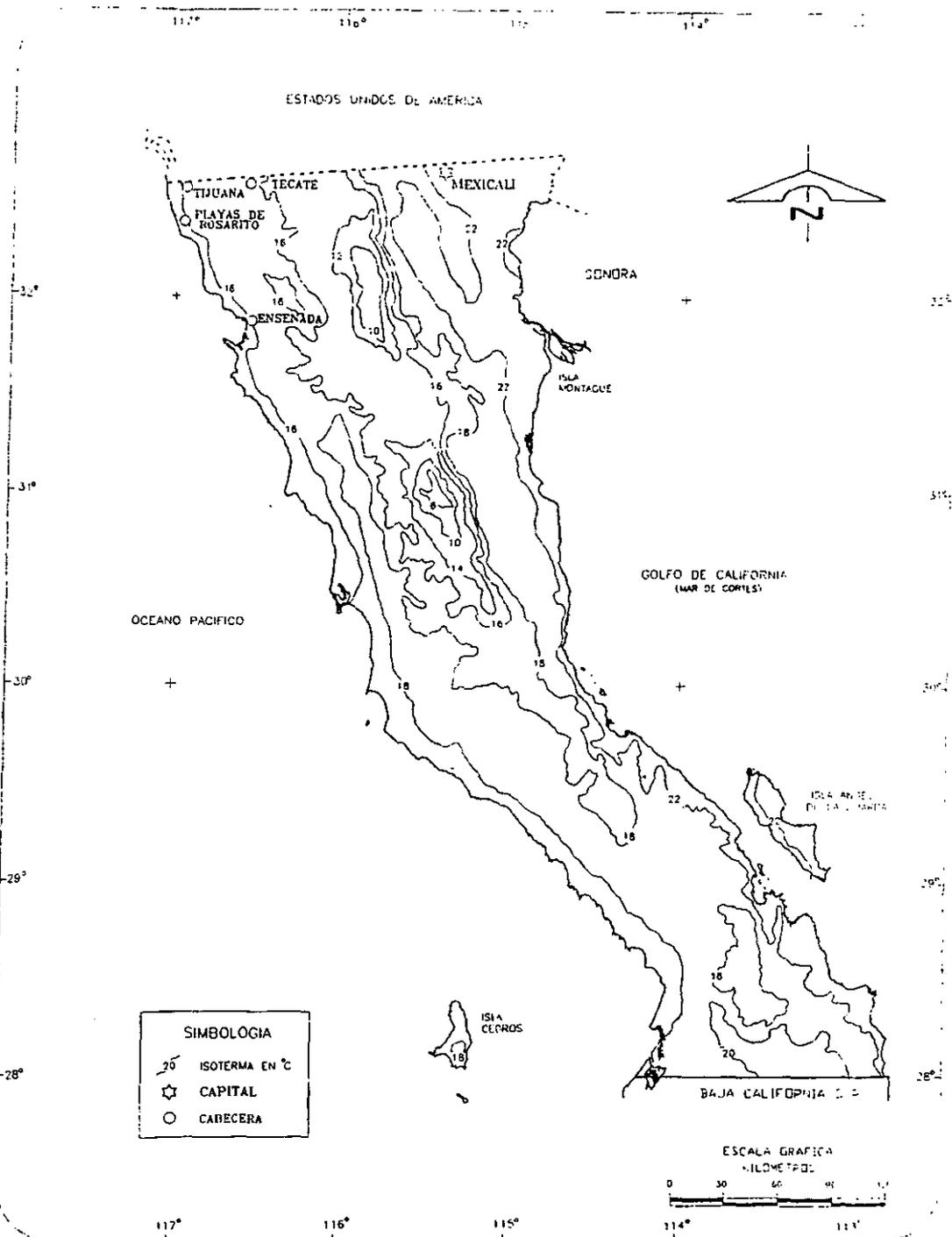


Climas

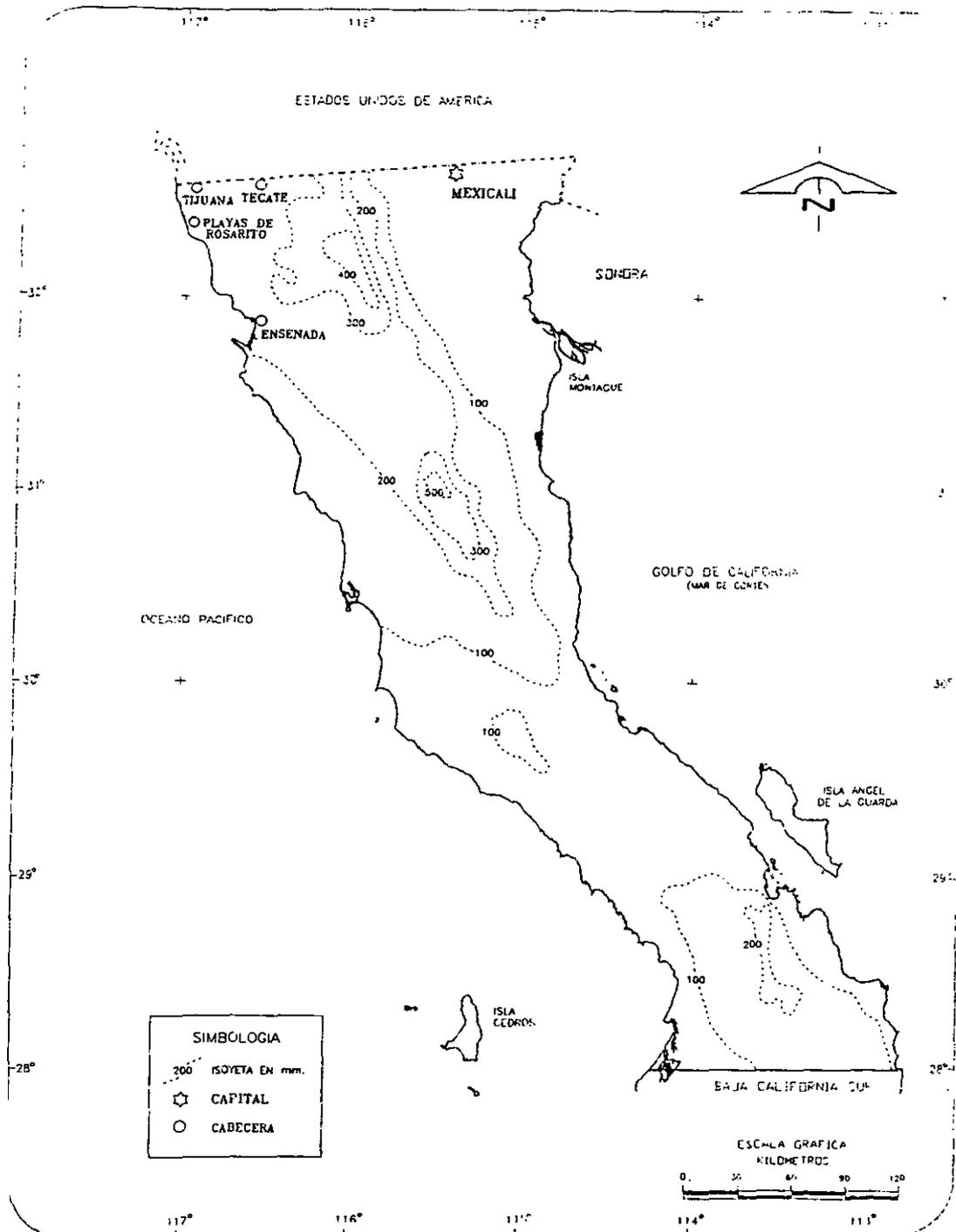


FUENTE: CGSNEGI. Carta de Climas, 1:1 000 000.

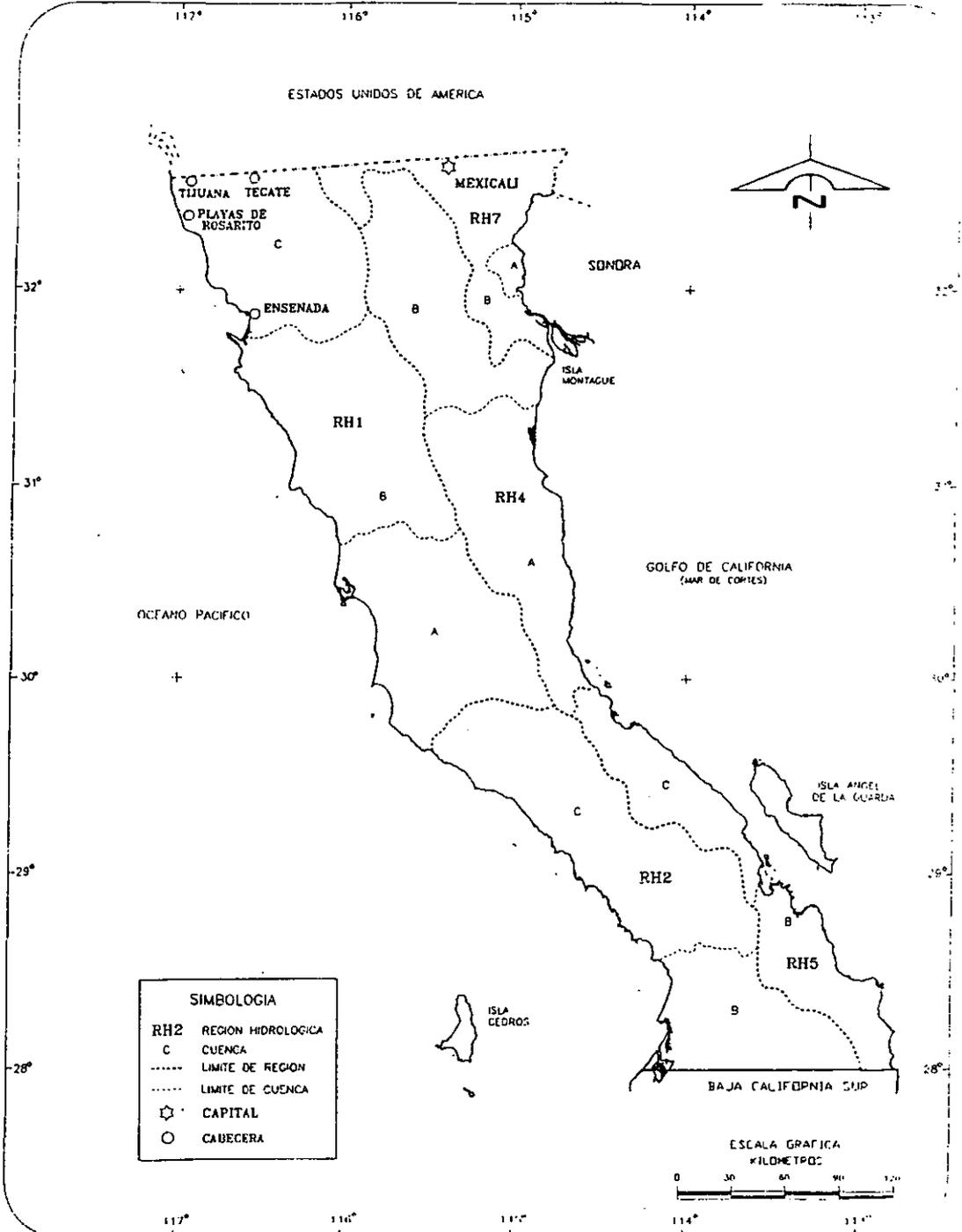
Isotermas



Isoyetas

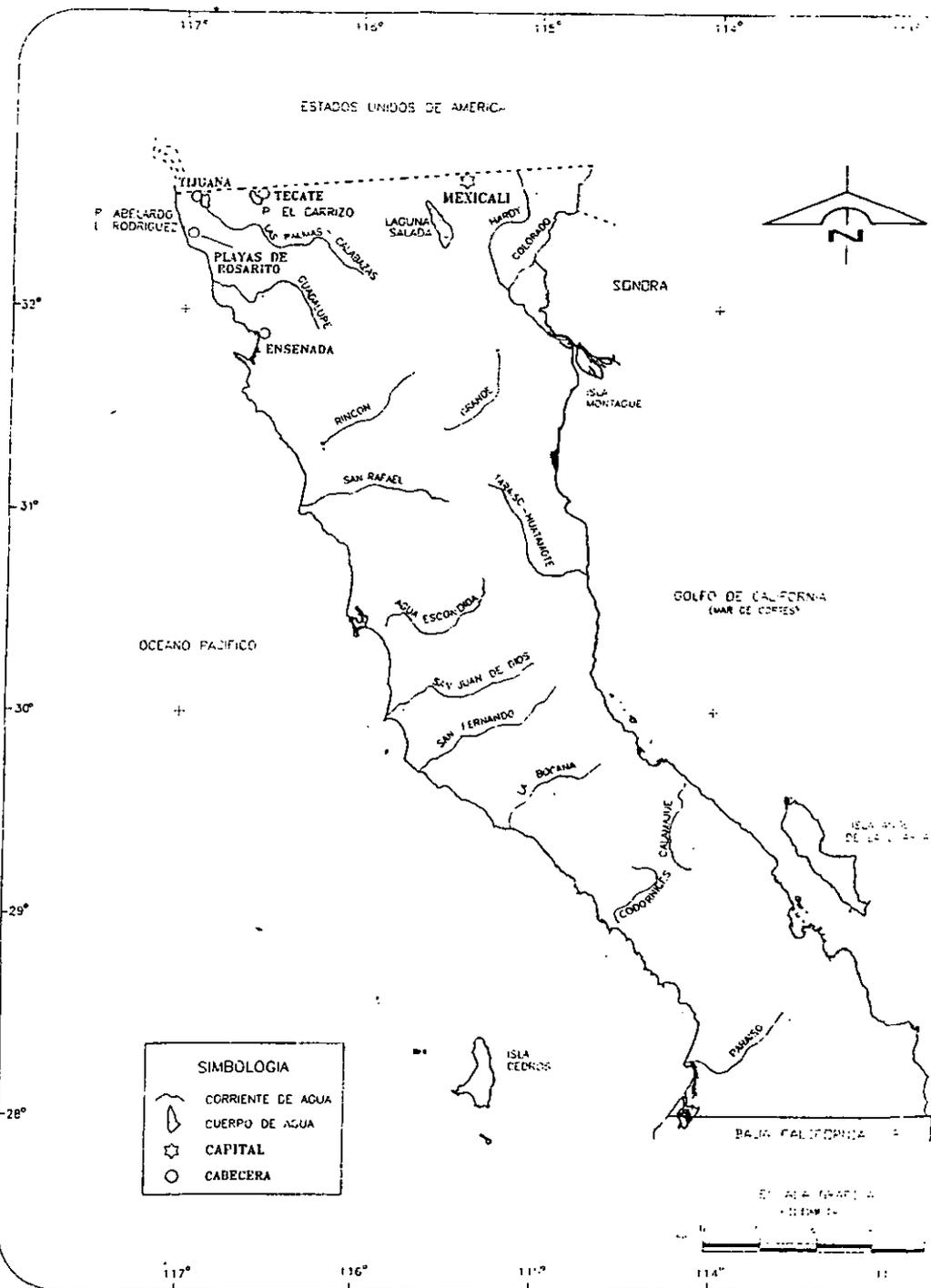


Regiones y Cuencas Hidrológicas



FUENTE: CGSNEGI. Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, 1:1 000 000.

Corrientes y Cuerpos de Agua



ANEXO B

Presa El Carrizo

Presa de almacenamiento y regulación, hacha de materiales graduados con corazón de arcilla, chapa de enrocamiento y vertedor natural. Recibe el agua procedente del Acueducto Río Colorado – Tijuana.

Tabla B.1

Capacidad total del vaso	43 564 000 m ³
Almacenamiento a la cresta del vertedor	39 460 000 m ³
Capacidad útil	34 220 000 m ³
Volumen muerto	5 240 000 m ³
Gasto máximo del vertedor	86 m ³ /s
Gasto máximo de la obra de toma	6 m ³ /s

La capacidad útil proporciona un almacenamiento suficiente para proveer se agua potable a la ciudad de Tijuana hasta por 5 meses.

Presa Abelardo L. Rodríguez

Construida desde el año de 1937, inicialmente para utilizar el agua para riego de las parcelas de la zona del Río Tijuana. Cuenta con la planta potabilizadora del mismo nombre, la cual trata un promedio de 500 l/s. Dicha planta fue construida en el año de 1975 para sanear el agua proporcionada a la ciudad de Tijuana, con una capacidad inicial de tratamiento de 300 l/s.

Desde el mes de junio de 1994 es utilizada la totalidad el agua almacenada en esta presa, al agregarse al sistema el acueducto que conduce el agua a la potabilizadora El Florido, agregándose a la capacidad de saneamiento ya existente.

Tabla B.2

Capacidad total del vaso	138 000 000 m ³
Almacenamiento a la cresta del vertedor	92 370 000 m ³
Capacidad útil	135 980 000 m ³
Volumen muerto	8 000 000 m ³
Altura máxima de la presa	125.00 m
Altura a cresta del vertedor	115.85 m

Planta potabilizadora El Florido

Construida en lo alto del rancho El Florido y a un nivel de 244.4 m.s.n.m., altura suficiente para enviar el agua por gravedad hacia la ciudad de Tijuana, disminuyendo así los costos de bombeo, recibe el agua de la presa Abelardo L. Rodríguez a través del acueducto construido con tal fin.

Capacidad total del proyecto: 4.0 m³/s.

Primer módulo: inicia operación el 25 de septiembre de 1982.

Capacidad: 2.0 m³/s.

Sistema Degremont – Pelletier con cámaras de vacío para provocar pulsaciones y retener sólidos en clarificadores. Cuenta con 12 filtros con 1.4 m de arena sílica de un milímetro de diámetro y 10 cm de grava como soporte.

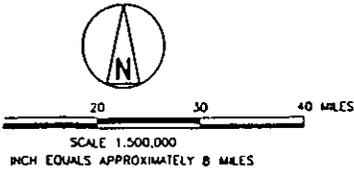
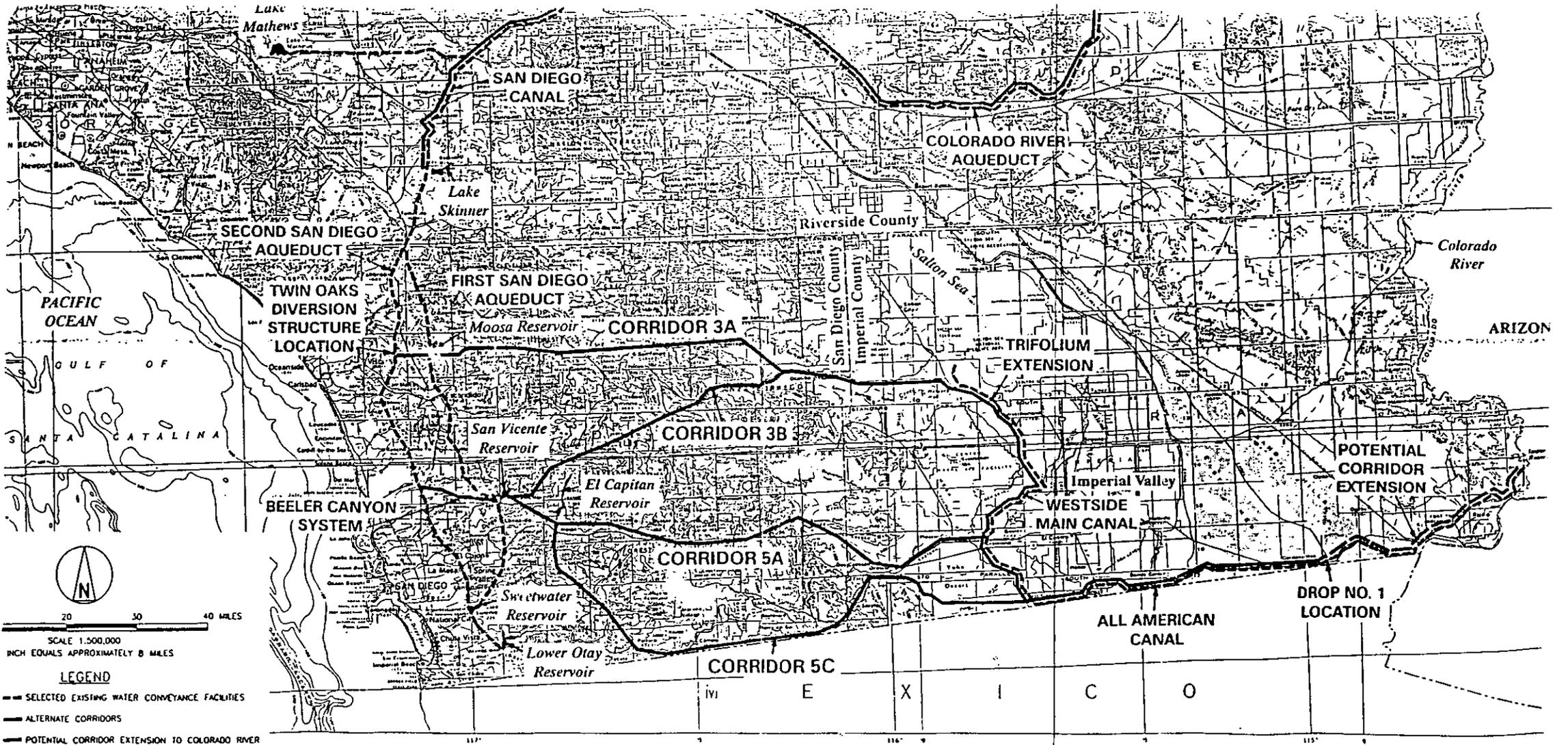
Segundo módulo: inicia operación el 9 de enero de 1993.

Capacidad: 2.0 m³/s.

Sistema de filtración directa. Cuenta con 12 filtros con 0.90 m de arena sílica de un milímetro de diámetro y 10 cm de grava de soporte.

Debido a la demanda actual de agua potable de la ciudad de Tijuana, esta potabilizadora trabaja para un gasto promedio de 2.4 2.0 m³/s, si bien está en condiciones de tratar los 4 m³/s de proyecto.

ANEXO C



LEGEND

- SELECTED EXISTING WATER CONVEYANCE FACILITIES
- ALTERNATE CORRIDORS
- POTENTIAL CORRIDOR EXTENSION TO COLORADO RIVER

Black & Veatch
San Diego, California

DESIGNED BY CTF	APPROVED
DRAWN BY MCS	DIRECTOR OF ENGINEERING DATE
CHECKED BY	PROJECT MANAGER DATE

SAN DIEGO COUNTY WATER AUTHORITY

3211 FIFTH AVENUE SAN DIEGO, CA 92103 619-297-3218

610 N. FIFTH AVENUE ESCROWWOOD, CA 92025 619-480-1991

IID WATER TRANSFER STUDY

ALTERNATE CORRI...

CCC DMC NO. 1

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

1. <http://www.ada.gov/desalfact.html>
2. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, *Anuario estadístico 1995*, INEGI, Vol. 2: Baja California Norte, 1995.
3. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, *Censo de población y vivienda*, INEGI, Vol. 2: Baja California Norte, 1960.
4. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, *Censo de población y vivienda*, INEGI, Vol. 2: Baja California Norte, 1970.
5. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, *Censo de población y vivienda*, INEGI, Vol. 2: Baja California Norte, 1980.
6. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, *Censo de población y vivienda*, INEGI, Vol. 2: Baja California Norte, 1990.
7. Secretaría de Asientos Humanos y Obras Públicas, *Programa de infraestructura hidráulica para el saneamiento ambiental y suministro de agua potable en Baja California*, Gobierno del Estado, septiembre de 1998.
8. Comisión Regional de la Península de Baja California, *Visita de trabajo del director general adjunto al estado de Baja California*, Comisión Nacional del Agua, mayo – junio de 1998.
9. CÉSAR Valdez, Enrique, *Ósmosis inversa para el tratamiento de aguas*, Facultad de Ingeniería UNAM, México, 1987, 245 pp.
10. RIVAS Mendoza, Carlos Edgar, *Destilación solar. Una alternativa para obtener agua dulce a partir de agua de mar*, Facultad de Ingeniería UNAM, México, 1990.
11. WEBER, Walter, *Control de la calidad del agua*, Ed. Reverté, España, 654 pp.
12. DAVIS & CORNWELL, *Introduction to environmental engineering*, Mc Graw Hill, 2ª ed., Singapur, 1991, 257 pp.
13. Bureau of Reclamation, Department of the Interior, *The Yuma Desalting Plant*, Yuma Projects Office, Arizona, EUA, 1996.
14. DE LA FUENTE, Emilio, *Opciones transfronterizas potenciales para la utilización de agua recuperada*, Memorándum técnico para la ciudad de San Diego, San Diego, EUA, febrero de 1998.

15. Metropolitan Wastewater Department, *South Bay area projects*, SDCWA, San Diego, EUA, 1998.
16. CÉSAR Valdez, Enrique, *Abastecimiento de agua potable*, Facultad de Ingeniería, 4ª ed., Vol. 1, México, 1994, 257 pp.
17. San Diego County Water Authority, *Water Repurification Project*, SDCWA, San Diego, EUA, 1998, pp. 1-9.
18. Comisión Nacional del Agua, *Estudio de nuevas fuentes de abastecimiento para las ciudades fronterizas del estado de Baja California*, CNA, enero de 1998.
19. <http://www.uabc.gob.mx>
20. Comisión Nacional del Agua, *Alternativas de abastecimiento para las zonas urbanas del norte del estado de Baja California*, CNA, septiembre de 1997.
21. FERNÁNDEZ Zayas, José Luis, *Tecnologías para la desalinización de agua*, Instituto de Ingeniería, Capítulo 4, México, 1998.
22. Universidad Autónoma de Baja California, *Estudio de los orígenes de las fallas en tuberías de concreto reforzado del acueducto Río Colorado – Tijuana*, UABC, Informe II-LCYM/UABC/001/MXLI, Mexicali, 1996.
23. BIANCHETTI, Ronald, *Corrosion and corrosion control of prestressed concrete cylinder pipelines*, MP, Oakland, EUA, 1993, pp. 62-66.
24. Allied corrosion industries, *Basic theory of corrosion*, Allied corrosion industries Inc., EUA, 1997.
25. LANG, Christopher, *Prestressed pipe repairs*, Lang Tendons Inc., Toughkenamon, EUA, 1994.
26. <http://www.sdcwa/prjcts/html>
27. Black & Veatch, *Feasibility level engineering for facilities to transfer water from the Imperial Irrigation District*, SDCWA, San Diego, EUA, 1996.