



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO  
EN INGENIERÍA  
FACULTAD DE QUÍMICA**

**MODELO DE PROYECTO  
PARA AUTOABASTECIMIENTO  
DE PEQUEÑAS COMUNIDADES AISLADAS  
DE AGUA PARA RIEGO AGRÍCOLA  
A PARTIR DE ENERGÍA RENOVABLE**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA DE SISTEMAS - INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN  
DE PROYECTOS

P R E S E N T A:

**JULIÁN HURTADO SÁNCHEZ**

TUTORA:

**M. C. LETICIA LOZANO RÍOS**

2012





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: M.I. Alejandro Anaya Durand

Secretario: M.I. Carlos Villanueva Moreno

Vocal: M.C. Jorge Eliecér Sánchez Cerón

1er. Suplente: M.I. Fernando Baez Ramos

2do. Suplente: M.C. Leticia Lozano Ríos

México, D. F.

**TUTORA DE TESIS:**

M.C. Leticia Lozano Ríos

---

...al hombre se le puede arrebatar todo salvo una cosa: *la última de las libertades humanas –la elección de la actitud personal ante un conjunto de circunstancias– para decidir su propio camino.*

...la libertad íntima nunca se pierde... *Es esta libertad espiritual, que no se nos puede arrebatar, lo que hace que la vida tenga sentido y propósito.*

...todos los aspectos de la vida son igualmente significativos...

...el único aspecto verdaderamente transitorio de la vida es lo que en ella hay de potencial...

...La transitoriedad de nuestra existencia en modo alguno hace a ésta carente de significado, pero sí configura nuestra responsabilidad, ya que todo depende de que nosotros comprendamos que las posibilidades son esencialmente transitorias... En todo momento el hombre debe decidir, para bien o para mal, cuál será el monumento de su existencia.

...El hombre se fija únicamente en la rastrojera de lo transitorio y pasa por alto el fruto ya granado del pasado de donde, de una vez por todas, él recupera todas sus acciones, todos sus goces y sufrimientos. Nada puede deshacerse y nada puede volverse a hacer. Yo diría que *haber sido es la forma más segura de ser.*

Viktor E. Frankl  
*El hombre en busca de sentido*

“...entre muchos hombres, aquel que es capaz de analizar y explorar profundamente la naturaleza del mundo, es superior a todos los demás. La persona inteligente que se vuelve experta en aprender de las enseñanzas que le ofrece el mundo, obtiene el verdadero beneficio de la vida. Aquel que se ha vuelto verdaderamente experto, es capaz de decodificar el entorno descubriendo aquello que se encuentra guardado en el fondo de la naturaleza.”

*En busca del Camino Dorado*  
*El Srimad Bhagavatam de Srila Vyasadeva*

...« On ne connaît que les choses que l'on apprivoise. Les hommes n'ont plus le temps de rien connaître... »

...Le langage est source de malentendus.

...« On ne voit bien qu'avec le cœur. L'essentiel est invisible pour les yeux. »

...« C'est le temps que tu as perdu pour ta rose qui fait ta rose si importante. » ...« Les hommes ont oublié cette vérité », dit le renard. « Mais tu ne dois pas l'oublier. Tu deviens responsable pour toujours de ce que tu as apprivoisé. Tu es responsable de ta rose... »

...« Les hommes, » dit le Petit Prince, « ils s'enfourment dans les rapides, mais ils ne savent plus ce qu'ils cherchent. Alors ils s'agitent et tournent en rond » « ...cultivent cinq mille roses dans un même jardin... et ils n'y trouvent pas ce qu'ils cherchent. » ...« Et cependant ce qu'ils cherchent pourrait être trouvé dans une seule rose ou un peu d'eau. »

*Le Petit Prince*  
*Antoine de Saint-Exupéry*

***Agradezco a la vida por colmarme de bendiciones; por mi Mamá, mi Hermano y mis Abuelitos; y por todas las personas que he conocido a lo largo de mi existencia, de quienes he aprendido y me he ganado su reconocimiento y aprecio, lo que me ha impulsado a luchar por ser mejor cada día...***

*jhs*

*Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para financiar gran parte de estos estudios de maestría, que culminaron en el presente trabajo de tesis.*

# CONTENIDO

<b>I. DEFINICIÓN DEL PROYECTO .....</b>	<b>9</b>
1.1. Hipótesis .....	9
1.2. Objetivos.....	9
1.3. Alcance.....	10
<b>II. PANORAMA ACTUAL.....</b>	<b>11</b>
2.1 Descripción del Estado .....	11
2.1.1 Características generales debidas a su localización geográfica .....	11
2.1.1.1 Geología.....	12
2.1.1.2 Climatología.....	12
2.1.1.3 Temperatura.....	12
2.1.1.4 Precipitación .....	12
2.1.1.5 Agua.....	14
2.1.1.5.1 Aguas Superficiales .....	15
2.1.1.5.2 Aguas Subterráneas .....	15
2.1.2 Población .....	17
2.1.3 Economía .....	18
2.1.3.1 Agricultura.....	19
2.1.4 Recursos energéticos.....	20
2.1.4.1 No renovables.....	20
2.1.4.2 Potencial de recursos renovables.....	21
2.1.4.2.1 Geotermia .....	21
2.1.4.2.2 Solar .....	22

2.1.4.2.3	Eólica .....	23
<b>2.2</b>	<b>Descripción de la zona del proyecto: valle de San Quintín .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Localización .....</b>	<b>24</b>
2.2.1.1	Clima .....	25
<b>2.2.2</b>	<b>Población .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Economía .....</b>	<b>26</b>
2.2.3.1	Agricultura.....	27
2.2.3.1.1	Cultivos .....	27
2.2.3.2	Acuicultura.....	28
2.2.3.3	Otras actividades .....	28
<b>2.2.4</b>	<b>Recursos.....</b>	<b>29</b>
2.2.4.1	Hídricos .....	29
2.2.4.2	Energéticos no renovables .....	29
2.2.4.3	Energéticos renovables existentes.....	29
<b>III.</b>	<b>ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Contexto socio-económico .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Necesidades de la región.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Agua para riego .....</b>	<b>35</b>
3.2.1.1	Sistema de riego .....	35
3.2.1.2	Demanda por cultivo .....	35
3.2.1.3	Demanda por Unidad de Riego.....	36
<b>3.3</b>	<b>Análisis de fuentes probables alternas de agua para riego .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Subterráneas.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Superficiales.....</b>	<b>39</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Desalación.....</b>	<b>40</b>
<b>3.4</b>	<b>Propuesta.....</b>	<b>41</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Antecedentes .....</b>	<b>42</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Objetivo .....</b>	<b>43</b>
<b>IV.</b>	<b>REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS Y SELECCIÓN DEL RECURSO ENERGÉTICO.....</b>	<b>44</b>

<b>4.1. Descripción general de la situación energética del estado y la zona de estudio.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1.1 Combustibles fósiles.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.2 Electricidad .....</b>	<b>46</b>
4.1.2.1 Situación del sistema eléctrico estatal .....	46
<b>4.1.3 Energías Renovables.....</b>	<b>50</b>
4.1.3.1 Energía geotérmica.....	50
4.1.3.2 Energía solar .....	51
4.1.3.3 Energía eólica.....	52
<b>4.1.4 Evaluación de las alternativas de obtención de energía .....</b>	<b>53</b>
4.1.4.1 Análisis cualitativo .....	54
4.1.4.1.1 Combustibles fósiles .....	54
4.1.4.1.2 Energía Eléctrica.....	55
4.1.4.1.3 Energías Renovables .....	56
4.1.4.1.3.1 Geotérmica .....	56
4.1.4.1.3.2 Solar.....	57
4.1.4.1.3.3 Eólica .....	58
4.1.4.2 Análisis cuantitativo .....	58
4.1.4.2.1 Energías convencionales.....	58
4.1.4.2.2 Energías Renovables .....	60
<b>4.1.5 Resultados.....</b>	<b>60</b>
<b>4.1.6 Conclusiones .....</b>	<b>62</b>
<b>V. ALTERNATIVAS DE DESALACIÓN: EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA .....</b>	<b>63</b>
<b>5.1 Aspectos fundamentales .....</b>	<b>63</b>
<b>5.1.1 Conceptos básicos .....</b>	<b>63</b>
5.1.1.1 Sólidos Disueltos Totales (TDS).....	63
5.1.1.2 Clasificación del agua salada .....	63
<b>5.1.2 Efectos ambientales .....</b>	<b>64</b>
<b>5.2 Selección tecnológica .....</b>	<b>65</b>
<b>5.2.1 Tipos de tecnologías.....</b>	<b>65</b>
5.2.1.1 Descripción general de las tecnologías de desalación: Características y parámetros de operación.....	66
5.2.1.1.1 Tecnologías de destilación .....	66
5.2.1.1.2 Tecnologías de membranas .....	67
5.2.1.1.2.1 Electrodialisis (ED) .....	67



5.2.1.1.2.2	Ósmosis Inversa (RO).....	68
<b>5.2.2</b>	<b>Evaluación de las tecnologías .....</b>	<b>70</b>
5.2.2.1	Análisis técnico-cualitativo .....	70
5.2.2.2	Análisis técnico-cuantitativo.....	72
<b>5.2.3</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>73</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Conclusiones sobre selección tecnológica .....</b>	<b>74</b>
<b>5.3</b>	<b>Requerimientos operativos específicos .....</b>	<b>74</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Calidad del agua de alimentación y producto .....</b>	<b>75</b>
5.3.1.1	Química del agua: tipo de agua de alimentación y análisis .....	75
5.3.1.2	Pre-tratamiento del agua de alimentación.....	75
5.3.1.3	Post-tratamiento del agua desalada.....	76
<b>5.3.2</b>	<b>Requerimientos energéticos.....</b>	<b>77</b>
5.3.2.1	Electricidad .....	77
<b>5.4</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>77</b>
<b>VI.</b>	<b>INGENIERÍA CONCEPTUAL: ESPECIFICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPO .....</b>	<b>79</b>
<b>6.1</b>	<b>Diagrama de Flujo del Proceso de Ósmosis Inversa .....</b>	<b>79</b>
<b>6.2</b>	<b>Variables de proceso de la ósmosis inversa .....</b>	<b>80</b>
<b>6.2.1</b>	<b>Recuperación .....</b>	<b>80</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Flujos de solvente y soluto .....</b>	<b>81</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Factor de Concentración.....</b>	<b>81</b>
<b>6.2.4</b>	<b>Otras variables .....</b>	<b>82</b>
<b>6.3</b>	<b>Dimensionamiento de la desaladora .....</b>	<b>83</b>
<b>6.3.1</b>	<b>Capacidad de la planta .....</b>	<b>83</b>
6.3.1.1	Proyección de la demanda .....	84
<b>6.3.2</b>	<b>Equipo principal .....</b>	<b>86</b>
6.3.2.1	Diseño del sistema de membranas de ósmosis inversa .....	87
<b>6.3.3</b>	<b>Diseño .....</b>	<b>87</b>
6.3.3.1	Pre-diseño.....	88
6.3.3.1.1	Cálculo analítico .....	88

<b>6.3.4</b>	<b>Simulación numérica .....</b>	<b>89</b>
6.3.4.1	Descripción del modelado realizado .....	89
6.3.4.2	Parámetros de diseño y de operación .....	90
6.3.4.2.1	Agua de alimentación .....	91
6.3.4.2.1.1	Composición .....	91
6.3.4.2.1.2	Temperatura.....	91
6.3.4.2.1.3	Flujo del permeado.....	92
6.3.4.2.2	Tipo de elemento de membrana .....	92
<b>6.3.5</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>92</b>
6.3.5.1	Diseño final: Conclusiones .....	93
6.3.5.2	Demanda energética de la planta.....	95
<b>6.4</b>	<b>Dimensionamiento del aerogenerador .....</b>	<b>96</b>
<b>6.4.1</b>	<b>Potencial eólico para generación eléctrica .....</b>	<b>97</b>
<b>6.5</b>	<b>Proveedores de equipo .....</b>	<b>98</b>
<b>6.5.1</b>	<b>Sistema de ósmosis inversa .....</b>	<b>98</b>
<b>6.5.2</b>	<b>Aerogenerador .....</b>	<b>98</b>
<b>VII.</b>	<b>ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO.....</b>	<b>100</b>
<b>7.1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>100</b>
<b>7.2</b>	<b>Estimación de costos .....</b>	<b>101</b>
<b>7.2.1</b>	<b>Consideraciones previas.....</b>	<b>101</b>
<b>7.2.2</b>	<b>Costos de construcción.....</b>	<b>103</b>
<b>7.2.3</b>	<b>Costos de operación y mantenimiento .....</b>	<b>104</b>
7.2.3.1	Costos fijos.....	104
7.2.3.2	Costos variables .....	104
7.2.3.3	Pago por electricidad.....	105
<b>7.3</b>	<b>Propuesta de financiamiento .....</b>	<b>106</b>
<b>7.4</b>	<b>Perspectiva social y ambiental de los costos de inversión y energéticos del proyecto .....</b>	<b>107</b>
<b>7.4.1</b>	<b>Análisis de la repercusión social .....</b>	<b>109</b>
<b>7.4.2</b>	<b>Repercusión ambiental.....</b>	<b>110</b>
<b>7.5</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>111</b>

<b>VIII. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>113</b>
<b>IX. APÉNDICES .....</b>	<b>118</b>
<b>A: Láminas de Riego .....</b>	<b>119</b>
<b>B: Dimensionamiento Sistema de Membranas .....</b>	<b>121</b>
<b>C: Composición del agua de alimentación .....</b>	<b>124</b>
<b>D: Datos de viento .....</b>	<b>126</b>
<b>X. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>128</b>

# I. DEFINICIÓN DEL PROYECTO

## 1.1. Hipótesis

De la revisión de la literatura existente en distintas fuentes sobre muy diversos estudios de la Península de Baja California, se plantea que es factible satisfacer en forma significativa la demanda de agua para riego agrícola de la comunidad del valle de San Quintín, Baja California, desalando el agua salobre del acuífero de la zona de manera económica, mediante el aprovechamiento del potencial eólico característico de ese estado.

Para ser atractivo el proyecto, se requiere verificar que tanto el empleo de la desalación de agua como el uso de energía eólica son la opción más viable y rentable de entre todas las fuentes de agua y energía posibles, para cubrir las necesidades de la planta y los requerimientos para producir una cantidad de agua desalada que resulte significativa en comparación con la demanda existente.

## 1.2. Objetivos

- ✓ Presentar una propuesta de proyecto para dotar de una fuente alterna de agua apta para riego agrícola a la comunidad de San Quintín, Baja California, definiendo la tecnología a emplear a partir del análisis de las posibles fuentes de obtención de agua y la disponibilidad de recursos energéticos en la región.
- ✓ Para lograr lo anterior, habrá que desarrollar la ingeniería conceptual y el estimado de costos con un rango de aproximación de  $\pm 40\%$ , del proyecto de una planta desaladora de agua salobre y energía eólica, que permitan evaluar la factibilidad y rentabilidad de dicho proyecto, y en caso favorable, sean una oportunidad para el desarrollo del resto del

mismo por inversionistas comprometidos con el desarrollo sustentable, con el que se coadyuvaría a mitigar la escasez de agua para riego que aqueja a la región.

### **1.3. Alcance**

El alcance de este trabajo comprende la realización de la ingeniería conceptual y del estimado de costos de la planta desaladora, para los cuales habrá que realizar lo siguiente:

1. Analizar las alternativas de obtención de agua apta para riego agrícola.
2. Analizar las alternativas de fuentes de energía en la zona de estudio.
3. Determinar la demanda mínima de agua de un campo de cultivo.
4. Análisis de las alternativas de obtención de los requerimientos energéticos de la planta en la zona del proyecto.
5. Analizar las alternativas de obtención de agua de alimentación a la planta.
6. Selección del proceso y la tecnología de desalación de agua de acuerdo al recurso energético más conveniente, la demanda mínima de agua de un campo de cultivo, así como la alternativa de obtención de agua salada.
7. Estimar el potencial eólico de la zona del proyecto.
8. Determinar la capacidad y el número de aerogeneradores necesarios para producir electricidad suficiente para la planta.
9. Dimensionar la planta desaladora con base en la información obtenida.
10. Propuesta de proveedores de equipo y pre-selección en una tabla comparativa.
11. Elaboración del estimado de costos.
12. Análisis de las fuentes de financiamiento.

## II. PANORAMA ACTUAL

### 2.1 Descripción del Estado

El Estado Libre y Soberano de Baja California se localiza en la región noroeste de México y se ubica geográficamente entre los meridianos 112° 48' 117" de longitud oeste y entre los paralelos 28° 00' y 32° 43' de latitud norte. Representa el 3,7 % de la superficie del país con 71.463 km<sup>2</sup> (Comisión Nacional del Agua, 2010). Políticamente está dividido en 5 municipios siendo estos Mexicali, capital de la entidad, Ensenada, Tecate, Tijuana y Playas de Rosarito (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2001).

#### 2.1.1 Características generales debidas a su localización geográfica

Colinda al norte con Estados Unidos de América, con quien comparte una frontera de 265 kilómetros de longitud; al noroeste con el Estado de Sonora, siendo éste el único vínculo terrestre de la Península con el resto del país; al este con el Golfo de California; al sur con Baja California Sur; al oeste con el Océano Pacífico (Comisión Estatal del Agua de Baja California, 2008). Cuenta con un área insular de 1.718,09 km<sup>2</sup> y con aproximadamente 1.406 km de litoral que representan el 12% del total de litorales del país, de los cuales un poco más de la mitad, 716,9 km, corresponden a las costas del Océano Pacífico y el resto, 688,8 km, a las costas del Golfo de California (Comisión Estatal del Agua de Baja California, 2008). Así mismo, tiene aproximadamente 320 kilómetros de mar patrimonial (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010).

Sus coordenadas geográficas lo ubican como el punto más al norte y más occidental de México, dentro de una zona árida y semiárida, donde se padece escasez de lluvias, mientras que su fisiografía y composición geológica son juveniles, con excepción del delta del Río Colorado (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2000).

#### **2.1.1.1 Geología**

La geología histórica del estado está dividida en tres eventos: pre-batolítico; emplazamiento en rocas batolíticas, con sus cuatro zonas metamórficas y post-batolítico. Por su estructura, la Península está clasificada en península oriental y central estable; litoral continental inestable y depresión del Golfo (Comisión Nacional del Agua, 2002).

#### **2.1.1.2 Climatología**

Los factores que determinan el clima del estado son la latitud, altitud, configuración superficial del terreno y la distribución de tierras y mares; de igual manera, la circulación atmosférica, las corrientes marinas y el sistema montañoso constituido por las sierras de Juárez y San Pedro Mártir contribuyen a las variaciones de precipitación, temperatura y evaporación.

La entidad tiene una gran diversidad de climas debido en gran parte a la Corriente de California, que es una corriente marina que fluye de norte a sur, cerca de las costas del Pacífico, de tal modo que se tiene clima semidesértico en el bajo delta del Río Colorado y planicie oriental; templado, desde la frontera noroeste hasta El Rosario; templado húmedo, en la parte central montañosa; y desértico, al sur, en las planicies. No obstante lo anterior, el 79,6 % de la superficie territorial estatal corresponde a región seca y árida, mientras que el restante 20,4 % es región templada (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010).

#### **2.1.1.3 Temperatura**

Existe una amplia variación de temperatura, en ambas zonas costeras y en la porción central y norte, donde existen zonas de mayor altura sobre el nivel del mar. El rango de temperatura media anual va desde menos de 6 grados centígrados, °C, hasta 24°C (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010), siendo el Valle de Mexicali, al noreste del estado, la zona con el mayor rango de temperatura media anual de 22°C (Gobierno del Estado de Baja California, 2008).

#### **2.1.1.4 Precipitación**

México está dividido en trece Regiones Hidrológico-Administrativas, que están formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos, para facilitar la administración y preservación de las aguas nacionales. Sus límites respetan los municipales, para simplificar la integración de la información socio-económica.

La península de Baja California es, por sí misma, la Región Hidrológico-Administrativa I y, dentro del territorio estatal de Baja California quedan comprendidas cinco de las siete regiones hidrológicas o cuencas que comprende dicha región hidrológico-administrativa, mostradas en la

figura 2.1, siendo dichas regiones la Número 1, Baja California Noroeste; Número 2, Baja California Centro-Oeste; Número 4, Baja California Noreste; Número 5, Baja California Centro-Este; y Número 7, Río Colorado. A su vez, estas regiones están divididas cada una en subregiones o subcuencas.

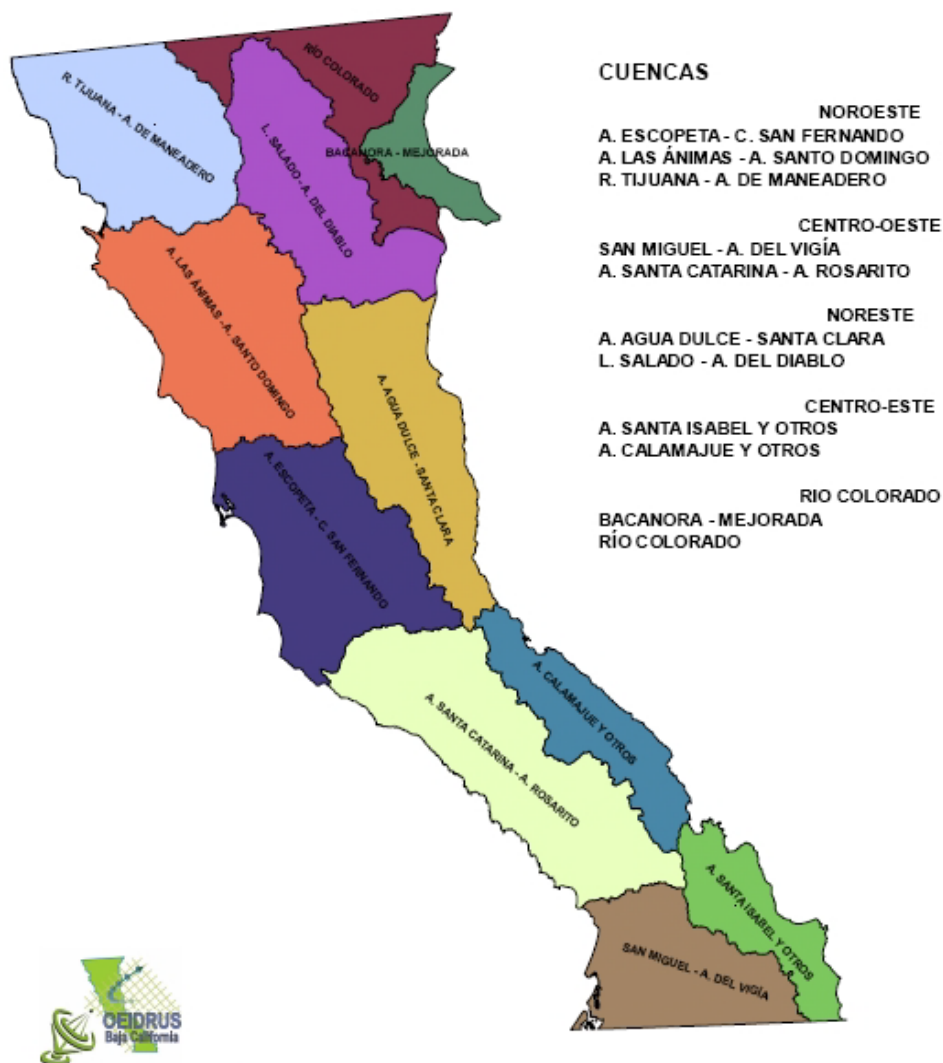


Figura 2.1 Cuencas Hidrológicas de Baja California  
Fuente: OEIDRUS, Gobierno del Estado de Baja California, 2010

Las lluvias son escasas en la mayor parte del estado. El rango de precipitación total anual va de menos de 100 a 600 milímetros, siendo que el periodo de mayor precipitación ocurre en el invierno, de diciembre a marzo (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010). En la franja costera del Golfo de California, se tiene la menor incidencia de precipitación, especialmente en el



delta del Río Colorado con un registro medio anual cercano a los 50 milímetros (Gobierno del Estado de Baja California, 2008).

El valor medio de la precipitación anual en las Regiones Hidrológicas en el estado es de 174,9 milímetros al año. El promedio de precipitación anual se dio en la Región Hidrológica No. 1 y 5 correspondientes a la zona noroeste y centro este de la entidad, con un promedio ponderado de 0,009 milímetros por cada kilómetro cuadrado al año (Gobierno del Estado de Baja California, 2008).

El rango de precipitación en las subregiones hidrológicas varió desde 35,2 milímetros al año, en la Subregión Hidrológica de Agua Dulce, en el centro este, hasta 290,2 mm/año, en la subregión hidrológica Tijuana (Gobierno del Estado de Baja California, 2008).

### 2.1.1.5 Agua

Las fuentes de abastecimiento de agua en Baja California son limitadas, consecuencia de su localización y geografía. En 2008 fueron concesionados 3.109,1 millones de metros cúbicos para los usos consuntivos de la entidad, dándosele al recurso los siguientes usos en las proporciones indicadas (Secretaría de Fomento Agropecuario del Estado de Baja California, 2010) y mostradas en la figura 2.2:

- Agrícola (92%)
- Público urbano (7%)
- Otros usos (1%)

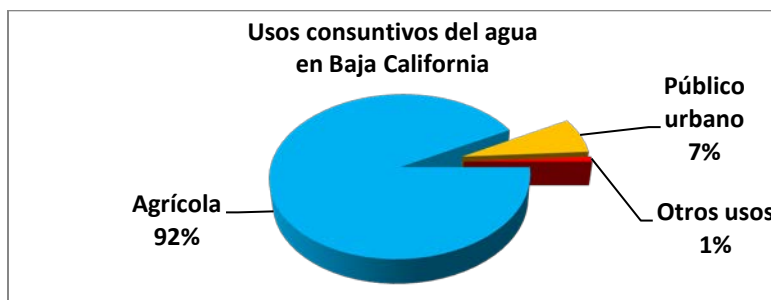


Figura 2.2 Usos consuntivos del agua en Baja California

Fuente: Secretaría de Fomento Agropecuario, Gobierno del Estado de Baja California, 2009

Estudios realizados por la Comisión Estatal de Agua de Baja California (CEABC) dados a conocer por la Secretaría de Fomento Agropecuario del estado (SEFOA) determinaron que, en 2001, existía un déficit de 17 millones de metros cúbicos, pudiéndose triplicar para el año 2010 debido al

incremento poblacional y de las actividades productivas y por la potencial disminución de lluvias. Tan solo en 2008, el volumen concesionado de agua para uso agrícola en Baja California fue de 2.566,3 millones de metros cúbicos,  $\text{hm}^3$  (Comisión Nacional del Agua, 2010) empleados en atender 207.000 hectáreas en el Valle de Mexicali y San Luís y 30.300 hectáreas en las unidades de riego del estado.

Por otro lado, la disponibilidad del agua en la entidad se determina en 2 orígenes: la superficial y subterránea y, en los últimos años, la reutilización de aguas tratadas (Secretaría de Fomento Agropecuario del Estado de Baja California, 2010).

#### **2.1.1.5.1 Aguas Superficiales**

Las aguas superficiales en el estado son en su mayoría corrientes de carácter intermitente, es decir, únicamente tendrán agua en sus causas cuando haya lluvias de consideración, de modo que han de presentar, por lo regular, volúmenes de escurrimiento pequeños, motivado por las escasas e irregulares precipitaciones.

Del agua superficial, se tiene un aprovechamiento medio anual de 1.918  $\text{hm}^3$  provenientes de 15 cuencas, entre las que destaca la cuenca del Río Colorado que aporta al Valle de Mexicali 1.850  $\text{hm}^3$ ; este volumen se tiene asegurado a través del tratado internacional de límites y aguas de 1944 con los Estados Unidos de América (Secretaría de Fomento Agropecuario del Estado de Baja California, 2010).

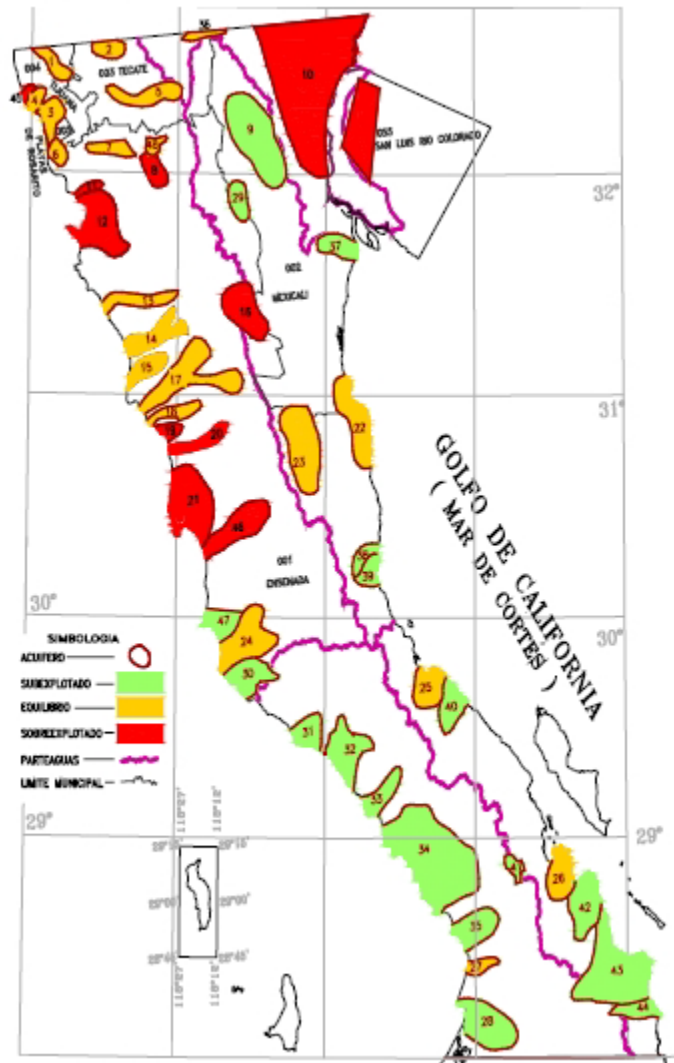
#### **2.1.1.5.2 Aguas Subterráneas**

Los acuíferos de la entidad son caracterizados por escaso espesor en su almacenamiento, como consecuencia de lo juvenil de su fisiografía y su composición geológica, además también por la escasez de lluvias y su localización en una zona árida y semiárida. La mayoría de ellos descarga al mar y están dedicados a la agricultura y al abastecimiento de agua de las poblaciones.

Existen en el estado 48 zonas acuíferas, mostradas en la figura 2.3, y una demanda a éstos de 1.347,1  $\text{hm}^3$ . De los acuíferos de la entidad son extraídos 1.149,8  $\text{hm}^3$ , siendo que en conjunto éstos acumulan una recarga media anual de 1099.5  $\text{hm}^3$ , resultando clara la sobre-explotación de los mismos; los otros 197,3  $\text{hm}^3$  requeridos se extraen del acuífero de la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado, Sonora, lo que permite aliviar en parte el nivel de presión sobre los recursos del estado y dejar el déficit del mismo en un valor de 50,3  $\text{hm}^3$  (Comisión Estatal del Agua de Baja California, 2008).

En el estado existen gran cantidad de valles intermontanos o costeros, que han dado lugar a la formación de acuíferos de relativa importancia; entre los primeros se encuentran Valle de Mexicali, Las Palmas, Guadalupe, Ojos Negros, Real del Castillo y La Trinidad, siendo el primero el

más importante por el volumen de explotación, de 719 hm<sup>3</sup> contra 700 hm<sup>3</sup> de recarga. Entre los valles costeros destacan La Misión, Maneadero, Santo Tomás, San Vicente, San Rafael, Camalú, San Quintín, San Simón, Laguna Salada, Valle Chico-San Pedro Mártir y San Felipe- Punta Estrella.



**Figura 2.3 Disponibilidad de aguas subterráneas**  
 Fuente: Programa Estatal Hídrico 2008-2013, Comisión Estatal del Agua de Baja California

En general, el potencial del acuífero es limitado como consecuencia de la escasa precipitación, pero es la única fuente que permite la subsistencia en estas subregiones. Prácticamente todos los valles con posibilidades de producción acuífera en el estado, se encuentran en explotación, ya sea en condiciones de equilibrio o bien, sobre-explotados; en el caso de los últimos se corre el riesgo de agotarlos si se llegaran a incrementar las extracciones. De los 48 acuíferos, 9 son los que están

más sobre-explotados y 29 están con veda rígida o reservada, es decir, no se autorizan nuevos aprovechamientos (Secretaría de Fomento Agropecuario del Estado de Baja California, 2010). En la tabla 2.1 se muestran las características de los acuíferos sobreexplotados, que tienen un nivel de calidad aceptable, a excepción de los de Maneadero, Camalú, San Quintín y San Simón, que presentan problemas de intrusión salina causada por la sobre-explotación. Además, el acuífero de Valle de Mexicali también presenta aumento en el nivel de salinidad, alcanzando niveles no aptos para uso agrícola.

Municipio	Acuífero	Recarga (hm <sup>3</sup> /año)	Extracción (hm <sup>3</sup> /año)	Sobre-explotación (hm <sup>3</sup> /año)
Ensenada	Ojos Negros	19,00	25,52	6,52
Mexicali	Valle de Mexicali	700,00	719,00	19,00
Ensenada	Maneadero	20,80	25,76	4,95
Ensenada	La Trinidad	24,35	30,17	5,82
Ensenada	Camalú	3,90	3,90	0,00
Ensenada	Colonia Vicente Guerrero	19,52	21,42	1,90
Ensenada	San Quintín	19,10	24,40	5,30
Ensenada	San Simón	13,50	19,00	5,50
San Luis Río Colorado, Son.	Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado, Sonora	100,00	197,30	97,30
<b>Suma</b>		<b>920,17</b>	<b>1066,47</b>	<b>146,30</b>
Porcentajes		100,00	115,90	15,90

**Tabla 2.1 Acuíferos sobre-explotados en Baja California**

Fuente: Programa Estatal Hídrico 2008-2013, Comisión Estatal del Agua de Baja California

### 2.1.2 Población

La población de Baja California al 2010 es de 3.155.070 2.844.469 habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2011), con tasas de crecimiento media anual que han sido de 3,5% para el periodo 1980-1990, de 1990-2000 de 4,3%, 2,4% para 2000-2005 y 2,3% para 2010 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2011), lo que indica que su población durante los próximos 25 años podría duplicarse, dando esto un panorama de velocidad a la que deberá crecer la infraestructura de bienes y servicios que permitan atender las necesidades crecientes de la población. A nivel municipal, la tasa de crecimiento total para Ensenada es de 3,9%, Mexicali crece a un ritmo del 2,3%, mientras que Playas de Rosarito lo hace al 7,7 % y los municipios de Tecate y Tijuana registran tasas de 5,2% y 4,9 %, respectivamente (Gobierno del Estado de Baja California, 2010). Lo anterior ubica a la entidad como una de las de mayor tasa de crecimiento, debido a la

vecindad fronteriza con los Estados Unidos de América así como por su nivel de desarrollo económico.

El Consejo Nacional de Población estimó que para 2007, la estructura poblacional estaría compuesta en un 49,93% por menores de 25 años, derivado de la migración, las altas tasas de nacimiento y de la declinación de los índices de mortalidad (Comisión Estatal del Agua de Baja California, 2008). Aunado a lo anterior, la población del estado presenta un proceso de envejecimiento favorecido por la inmigración y el descenso en la fecundidad. De modo que esto también impactará en la demanda futura de empleo, vivienda y servicios de cada segmento poblacional.

Frente a este panorama, la planeación de las políticas públicas de gobierno debe ser redimensionada de modo que sus objetivos, programas y proyectos estén acordes a este contexto (Comisión Estatal del Agua de Baja California, 2008).

### **2.1.3 Economía**

Baja California se ubica en el décimo lugar en su contribución al PIB nacional, y en los primeros lugares cuando se le considera por su dinámica de crecimiento económico. En periodos de relativa estabilidad suele crecer por encima de la media nacional. Este dinamismo es una de las principales fortalezas de la entidad, lo cual ha contribuido a mantener tasas relativamente bajas de desempleo. Sin embargo, la desaceleración económica mundial de los últimos cinco años y la competencia con países de reciente industrialización, con una cada vez mayor presencia de sus bienes en el comercio mundial, sobre todo en el estadounidense, influyeron en la disminución del ritmo de crecimiento económico estatal promedio, al pasar de 6,76% entre 1996-2001 a 4,45% en el periodo 2002-2007. En 2007, Baja California contribuyó con el 3,42 % del PIB nacional (Comisión Nacional del Agua, 2010). En la industria maquiladora asentada en la entidad se emplean a cuatro de cada diez habitantes (Gobierno de Baja California, 2008).

En 2005 Baja California registró más de medio millón de habitantes en las zonas rurales (18,6 % de la población total), distribuidos en más de cuatro mil localidades. En el medio rural los niveles de ingreso suelen ser sensiblemente menores a los de las grandes zonas urbanas, por lo que la pobreza es mayor en la sociedad rural que en la urbana, estimándose, para el caso de esta entidad, que 55% de la población ocupada en actividades agropecuarias reciben dos salarios mínimos o menos, mientras que en la industria y los servicios la población con ese rango de ingreso representa 38% (Gobierno de Baja California, 2008).

El estado cuenta con dos grandes zonas de producción primaria: el Valle de Mexicali y la zona costa. La primera cuenta con una superficie agrícola bajo riego de más de 182 mil hectáreas, en donde son intensivas las actividades agrícolas y pecuarias. También es en esa región donde encuentra la mayor parte de la agroindustria de la entidad, y en materia de pesca sobresale el puerto de San Felipe, en el Golfo de California (Gobierno de Baja California, 2008).

La zona costa cuenta con alrededor de 25 mil hectáreas de riego y 58 mil de temporal, destaca el municipio de Ensenada y comprende también los de Tecate, Playas de Rosarito y Tijuana; sobresale la producción de hortaliza en la región de San Quintín y la ganadería extensiva y la producción de leche altamente tecnificada en los municipios de Playas de Rosarito, Tijuana y Tecate. Ensenada concentra la mayor parte de la actividad pesquera y acuícola del estado, así como los principales recursos forestales que se encuentran básicamente en tres áreas naturales protegidas (Gobierno de Baja California, 2008).

Entre las bahías más importantes de la entidad por su producción acuícola están: Bahía de Todos Santos, donde se ha intentado desarrollar el cultivo de mejillón, en esta bahía se encuentra el Puerto de Ensenada; la Bahía de San Quintín donde se desarrolla el cultivo de ostión, la Bahía de San Luis Gonzaga, Bahía de Los Ángeles y Bahía de San Fermín entre otras (Comisión Estatal del Agua de Baja California, 2008).

### **2.1.3.1 Agricultura**

En México, la superficie cultivable se divide en Distritos de Riego y en Unidades de Riego. Estas entidades fueron diseñadas de acuerdo con la tecnología prevaleciente para la aplicación del agua por gravedad en las parcelas (Comisión Nacional del Agua, 2010). Más de la mitad de la superficie cultivable corresponde a distritos de riego y el resto a unidades de riego. Los primeros son proyectos desarrollados por el gobierno federal e incluyen diversas obras, tales como vasos de almacenamiento, derivaciones directas, plantas de bombeo, pozos, canales y caminos entre otros. Por su parte, las Unidades de Riego (UDERALES) son operados por pequeños propietarios, que en algunos casos se encuentran organizados y en otros no, además de que debido a su complejidad, variedad y extensión, generalmente reducida, no se cuenta con información actualizada y detallada sobre los beneficiarios, superficies, patrones de cultivos, estadísticas de producción y volúmenes utilizados en ellas (Comisión Nacional del Agua, 2010). A estos productores del campo pequeños y medianos, les es altamente costoso producir y se encuentran desfasados de los procesos tecnológicos y económicos, y al principio de encadenamientos con pocas posibilidades de integrarse a otros eslabones de la cadena económico-productiva, precisamente por el tamaño de sus unidades y por la falta de asociación entre ellos (Gobierno de Baja California, 2008).

Existen seis zonas productoras agrícolas de importancia económica en Baja California, comprendidas en dos Distritos de Desarrollo Rural (DDR). El DDR 002 "Mexicali" abarca al valle del mismo nombre y es también un Distrito de Riego, que destaca por la producción de trigo, algodón y alfalfa por la superficie sembrada, y cebollín por su alto valor de comercialización. Por su parte, el DDR 001 "Ensenada" comprende las zonas de los valles de Guadalupe, Maneadero, Ojos Negros, El Rosario y San Quintín; está conformado por cuatro Centros de Apoyo para el Desarrollo Rural (CADER), que a su vez comprenden unidades de riego: El CADER Tijuana, que engloba a los municipios de Tijuana y Playas de Rosarito; el CADER Tecate, que comprende al municipio del mismo nombre; y los CADER Ensenada y San Quintín dentro del municipio de Ensenada. Los

principales cultivos de este DDR son jitomate, cebolla, uva, fresa, olivo (Secretaría de Fomento Agropecuario del Estado de Baja California, 2010).

El sector agrícola estatal realiza prácticas poco sustentables que ya han impactado de forma negativa. Se puede mencionar, por ejemplo, el hecho de que hasta la fecha no existe reglamentación alguna en cuanto a la aplicación de compuestos agroquímicos, por lo que debido a esto y a la forma en que son aplicados en los cultivos, que es de forma aérea y local, se tienen consecuencias negativas a la salud pública así como también a la fauna residente y migratoria en los Valles de Mexicali, Guadalupe, Maneadero y San Quintín, debido a la dispersión de sus partículas. Además, los campos de cultivo son preparados realizando quemas agrícolas, que en conjunto con los polvos dispersos de campos abandonados favorecen la desertificación del terreno (Gobierno de Baja California, 2008).

Por otro lado, la explotación excesiva de los acuíferos de agua para riego agrícola, que desde hace varias décadas tiene lugar en volúmenes mayores a su capacidad de recarga natural, ha provocado un desequilibrio entre el abatimiento del nivel del acuífero y la presión subterránea del agua de mar, dando como resultado la intrusión del agua salada a los acuíferos y deteriorando la calidad del líquido, por lo que al ser aplicado para riego ocasiona la degradación del suelo por contaminación salina, derivando en el desuso y abandono de tierras cultivables que quedan deforestadas, propiciando la desertificación, con lo que nuevas áreas deben ser abiertas a la agricultura, que tienen el riesgo de correr con la misma suerte (Gobierno de Baja California, 2008).

#### **2.1.4 Recursos energéticos**

##### **2.1.4.1 No renovables**

La Península de Baja California carece de fuentes propias de recursos fósiles, mientras que las que le abastecen se ubican demasiado lejos. No obstante, parte de las necesidades que de éstos y de sus derivados se tiene en la entidad, son satisfechas por importaciones realizadas vía marítima o subterránea desde el interior del país o desde el extranjero.

Debido a la gran densidad de población, es la región norte del estado en donde se concentra casi la totalidad de la infraestructura de estos energéticos con que cuenta la entidad, como terminales marítimas, de almacenamiento y reparto, y poliductos. De igual manera, la red eléctrica y las centrales generadoras están concentradas principalmente en dicha región y en parte de la zona centro de la costa del Pacífico, como se verá más adelante en el capítulo IV.

#### **2.1.4.2 Potencial de recursos renovables**

La Península de Baja California posee un enorme potencial de energías renovables como lo son la eólica, la solar, la geotérmica y la del mar, en esta última se incluye a las mareas y a las corrientes marinas. Dicho potencial ha sido corroborado por diversos estudios realizados por instituciones tanto nacionales como extranjeras a lo largo ya de varios años. Sin embargo, al igual que como ocurre en casi todo el resto del país, ninguno de estos recursos renovables ha sido estudiado con el nivel de detalle necesario para materializar proyectos para su explotación comercial, pues todavía hasta hace algunos años, los bajos precios de los combustibles fósiles acaparaban la atención de los distintos sectores de consumo, aun cuando las energías renovables ya comenzaban a mostrar un buen nivel de competitividad tanto en eficiencia como en costos. A continuación se abordará por separado cada uno de los recursos renovables más importantes de Baja California.

##### **2.1.4.2.1 Geotermia**

El mayor aprovechamiento de México de esta energía se ubica cerca de Mexicali, en la central Cerro Prieto, con 720 MW y representa el 75% de la capacidad geo-termoeléctrica instalada (Comisión Federal de Electricidad, 2010).

Por otro lado, en la península abundan los manantiales de agua caliente junto al mar, como es el caso de Maneadero y San Felipe, entre otros. También los hay en el mar, a pocos metros de la costa, como lo son La Bufadora, Punta Banda y Puertecitos. Algunos de esos manantiales registran temperaturas de hasta 84°C, por lo que son clasificados como recursos geotérmicos de baja entalpía y que, sin embargo, pueden ser aprovechados con plantas diseñadas para dichas condiciones (Alcocer & Hiriart, 2008). En la figura 2.4 se pueden observar todos los lugares de la península en los que se han encontrado fuentes termales.



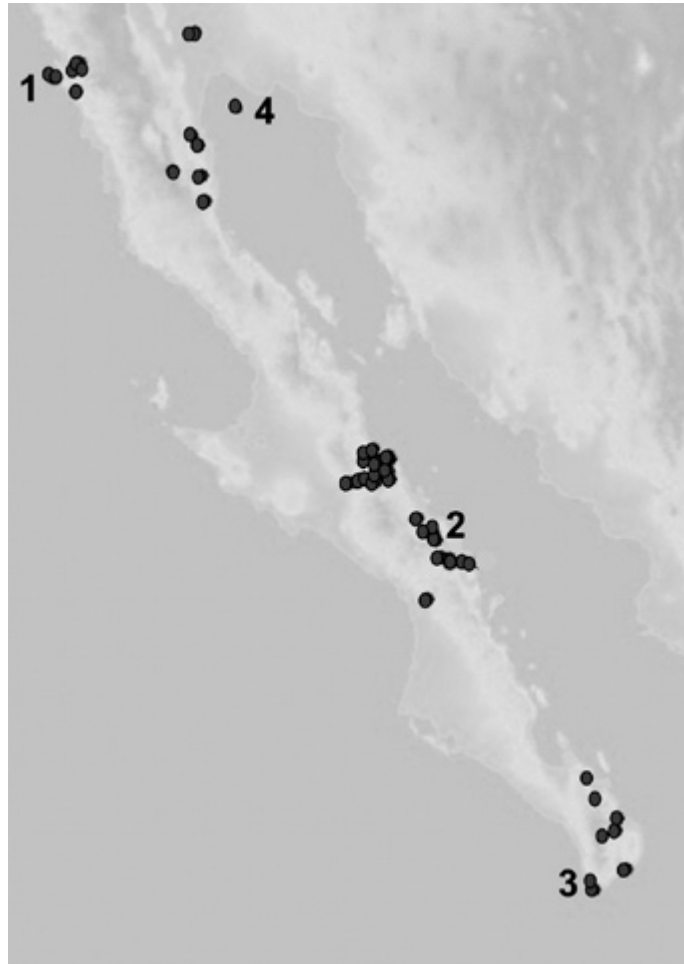
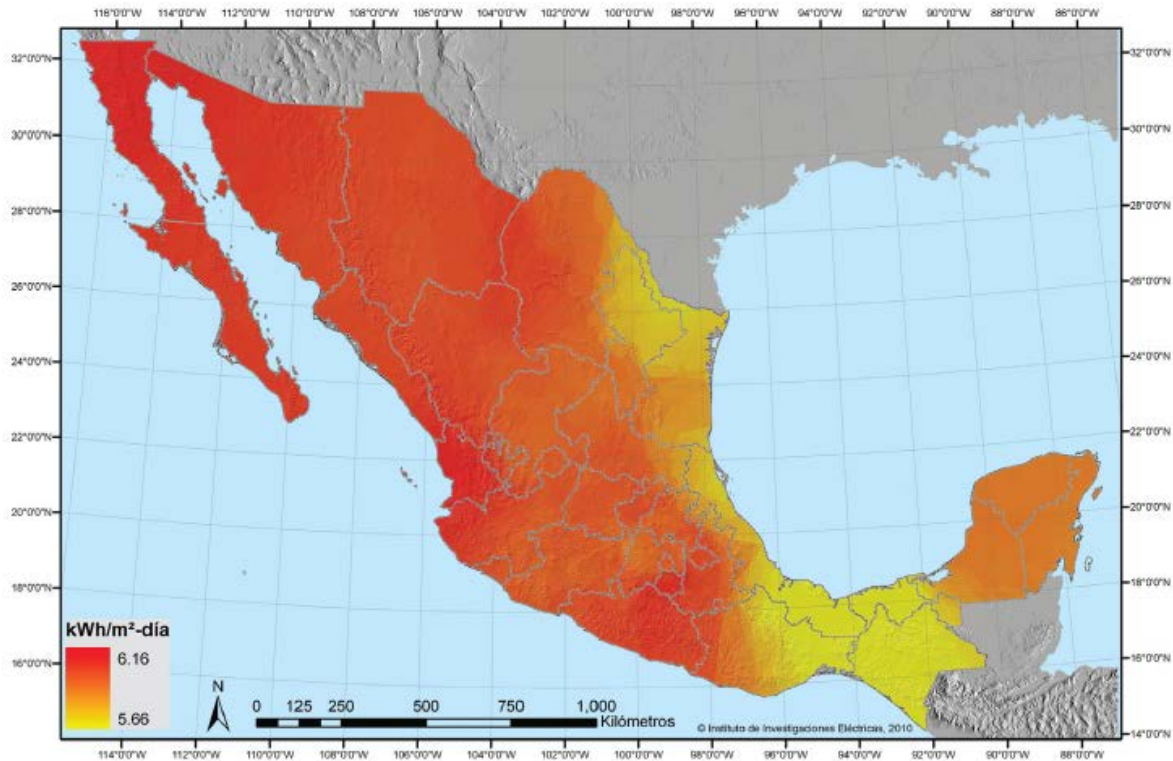


Figura 2.4 Áreas geotérmicas reportadas en la Península de Baja California  
Fuente: (Prol-Ledesma, 2010)

#### 2.1.4.2.2 Solar

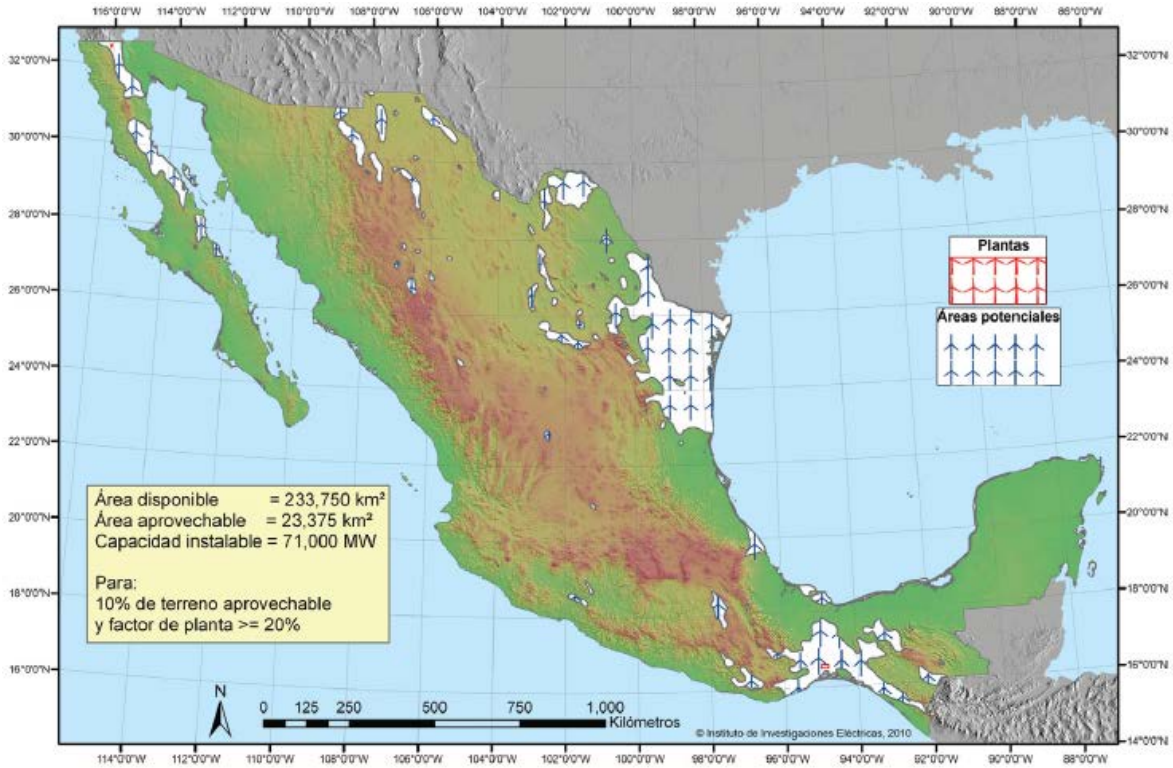
México es uno de los países con mayor nivel de irradiación solar a nivel mundial y, en particular, en la península de Baja California se tienen promedios que oscilan entre los 5 y 6 kilowatts-hora por metro cuadrado diario, kWh/m<sup>2</sup>/día (Bermúdez-Contreras, Thomson, & Infield, 2008), de los más altos del país, y así lo confirma también el Atlas de Recursos Renovables Eólicos y Solares de México de 2010, como puede apreciarse en la figura 2.5 mostrada a continuación:



**Figura 2.5 Atlas de recurso renovable solar de México**  
**Fuente: SENER, 2010**

### 2.1.4.2.3 Eólica

El Atlas de Recursos Renovables Eólicos y Solares de México de 2010, también ha confirmado las zonas que se presumía tendrían un gran potencial de energía eólica para generación eléctrica en México, como se aprecia en la figura 2.6, y uno de esos casos corroborados es Baja California, en las sierras de La Rumorosa y San Pedro Mártir (274 MW) (Secretaría de Energía-Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, 2009), pues se pueden encontrar grandes extensiones de terreno en las que se podrían instalar granjas eólicas con factores de planta iguales o mayores a 20%. Actualmente ya existe en el estado una de estas granjas en operación en La Rumorosa, con una capacidad instalada de 10 MW producidos por cinco aerogeneradores de 2 MW cada uno, operando desde el año 2009 (Comisión Estatal de Energía. Gobierno de Baja California, 2009).



**Figura 2.6 Atlas de recurso renovable eólico de México**  
**Fuente: SENER, 2010**

## 2.2 Descripción de la zona del proyecto: valle de San Quintín

### 2.2.1 Localización

El valle de San Quintín, se ubica en la porción centro-occidental del estado, en los 30° 34' de latitud norte y los 115° 57' de longitud oeste, a una altura sobre el nivel del mar de 30 metros (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010), y es una de las principales localidades del municipio de Ensenada, cuya división política comprende 23 delegaciones municipales, entre ellas la de San Quintín. Está comunicado con el resto de la entidad a través de la Carretera Federal No. 1 que lo conecta con Ensenada, hacia el norte, y con La Paz, Baja California Sur, hacia el sur (Comisión Nacional del Agua, 2002).

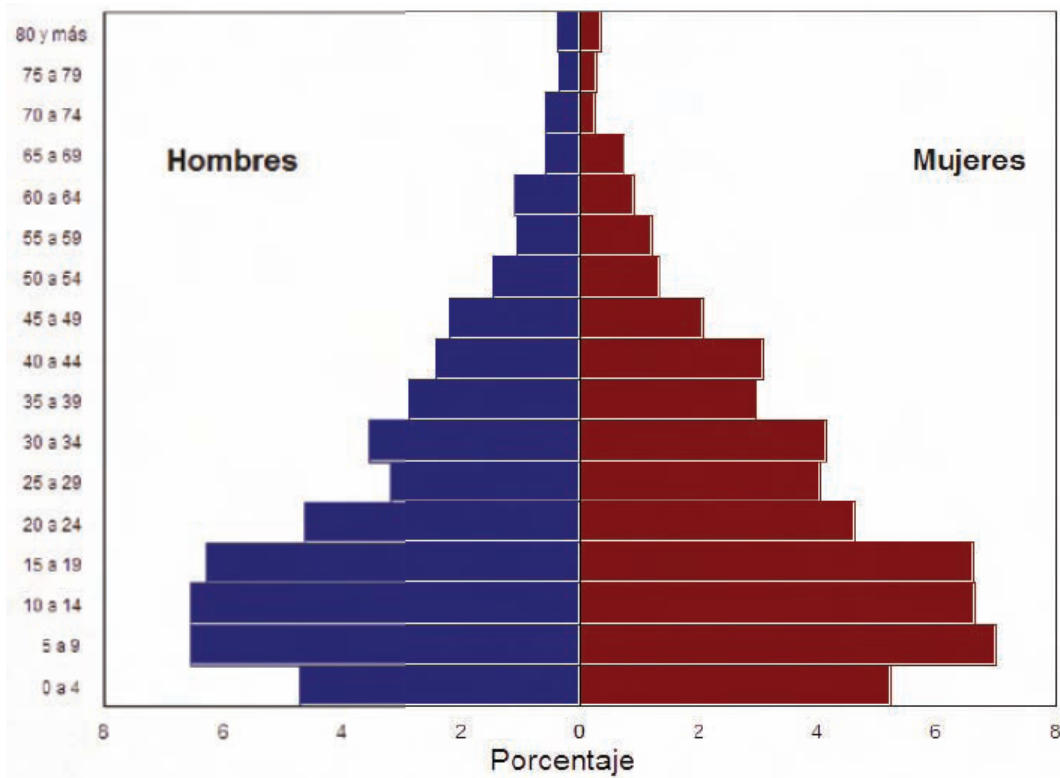
### **2.2.1.1 Clima**

La zona se encuentra caracterizada por tres tipos de climas: seco templado, muy seco semi-cálido y muy seco templado. En general, su clima se considera del tipo mediterráneo templado, con temperatura anual promedio de 15 a 16°C y mínima de 5°C, alcanzando en el verano una temperatura máxima de 35°C. El período más caluroso del año abarca de julio a septiembre, en tanto que el más frío va de diciembre a enero. La temporada de lluvias va de noviembre o diciembre a febrero o marzo, con una precipitación promedio anual durante los últimos 30 años de 195 a 200 milímetros; y de mayo a octubre se reducen drásticamente los índices de precipitación (Comisión Nacional del Agua, 2002), (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Delegación Estatal en Baja California, 2010). Por su parte, la evaporación potencial media anual varía entre 1.100 y 1.580 mm; manifestándose los mayores índices de evaporación en los meses de mayo, junio, julio y agosto; en tanto que en los meses de diciembre y enero, se tienen los valores más bajos.

### **2.2.2 Población**

Para realizar una mejor planeación de las estrategias que promuevan el desarrollo sustentable, el gobierno estatal y el municipal de Ensenada dividieron ese municipio en tres regiones. El valle de San Quintín abarca a las localidades Vicente Guerrero, Lázaro Cárdenas y San Quintín, y forma parte de la Región San Quintín. En este valle habitan aproximadamente 50.000 personas, cifra que aumenta durante el periodo de cosecha con 15.000 jornaleros agrícolas migrantes, provenientes de los estados de Oaxaca, Guerrero y Michoacán, y se distribuyen en diversos campamentos agrícolas (Conservation Biology Institute & The Nature Conservancy, 2007) (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Delegación Estatal en Baja California, 2010).

De la recopilación e integración de datos socio-económicos de esa región se obtuvieron indicadores que caracterizan su nivel de desarrollo social y económico actual, por lo que describe también a la zona de estudio. Tales datos muestran que el crecimiento anual promedio de la población en la región es de 5,36%, que es dos veces superior al observado en el estado, mientras que el 46,8% de la población no cuentan con servicios de salud, 87,3% de la población de 6 a 14 años saben leer y escribir, y de dicho rango de edad, el 89,8% de la población asiste a la escuela, con un grado de escolaridad de 6 años (Gobierno del Estado de Baja California, 2008).

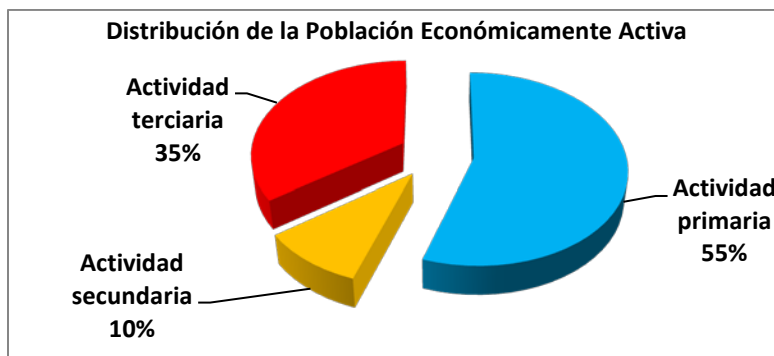


**Gráfica 2.1 Estructura poblacional de la Región San Quintín por sexo y grupos quinquenales de edad. Encuesta, 2006**  
 Fuente: Gobierno del Estado de Baja California-Universidad Autónoma de Baja California, 2006

En la gráfica 2.1 anterior puede observarse un rápido crecimiento de la población, donde el 42% está representado por niños y jóvenes entre los 5 y 19 años de edad, por lo que pudiera esperarse para los próximos 15 años mayores exigencias sociales en generación de empleos, dotación de servicios públicos, de salud, educación y esparcimiento en la región.

### 2.2.3 Economía

Como se observa en la gráfica 2.2, de la Población Económicamente Activa (PEA), el 55% se dedica a actividades primarias, siendo la agricultura la actividad de mayor importancia en la región, orientada hacia el sistema de la producción de invernaderos, pero demandante en mano de obra (Comisión Estatal del Agua de Baja California, 2008). Por su parte la actividad ganadera está supeditada al cultivo de forrajes, de tal forma que adquiere un carácter secundario por depender del desarrollo agrícola (Comisión Nacional del Agua, 2002). También las actividades acuícola y pesca son importantes en el valle, llevadas a cabo en la Bahía de San Quintín.



**Gráfica 2.2 Distribución de la PEA en la Región San Quintín, 2006**

Fuente: Gobierno del Estado de Baja California-Universidad Autónoma de Baja California, 2006

Así mismo, el 47,4% de la PEA no percibe algún tipo de prestación laboral, 39,5% de la población percibe de 1 a 2 salarios mínimos y el 36% de 2 a 5 salarios mínimos, lo que ubica a la región en los estratos de umbral de pobreza y pobreza moderada. Además, la tasa de desempleo al 2006 fue del 3,9% según datos oficiales (Gobierno del Estado de Baja California, 2008).

### 2.2.3.1 Agricultura

El territorio destinado a siembra agrícola en el valle de San Quintín está organizado en Unidades de Riego (URDERALES) y abarca una superficie total de poco más de 43.000 hectáreas, entre superficie de riego y de temporal; de las cuales, el 37% (16.000 hectáreas, aproximadamente) son de riego, y 27.000 hectáreas son de la modalidad temporal; siendo las hortalizas por su importancia económica y generación de mano de obra, el sector más importante de la región.

De las 43.000 hectáreas totales de superficie agrícola, en 2009 únicamente se aprovechó el 52,5% (22.625 hectáreas) y, de dicha cifra, aproximadamente 7.600 hectáreas fueron para cultivos de riego (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Delegación Estatal en Baja California, 2010).

#### 2.2.3.1.1 Cultivos

Son sembrados muy variados tipos de cultivos, entre cíclicos y perennes. De los del primer grupo se siembra el apio, avena forrajera, brócoli, calabacita, cebada forrajera acicalada, cebolla, chícharo, chile verde, cilantro, col, col de bruselas, ejote, elote, flores, frambuesa, frijol, haba verde, lechuga, maíz forrajero, pastos y praderas, pepino, rabanito, sandía, sorgo forrajero, jitomate, tomate verde, trigo y zanahoria. De los cultivos perennes se tienen aceituna, aguacate,

alfalfa verde, fresa, higo, limón, manzana, naranja, nopalitos y nuez (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2010).

No obstante, de los antes citados son sólo algunos los que representan mayor importancia para el sector debido a su valor de venta, y actualmente, estos son el jitomate y la fresa (Aguirre-Muñoz & Buddemeier, 2001); mientras que otros destacan por su volumen de producción, como la alfalfa, calabacita, cebolla, chile verde, col de bruselas y pepino, y también algunos forrajes que son cebada, sorgo, trigo y maíz. Los cultivos comerciales como el jitomate, la fresa y flores son sembrados principalmente para su exportación a los EE.UU. (Conservation Biology Institute & The Nature Conservancy, 2007).

### **2.2.3.2 Acuicultura**

La bahía de San Quintín es uno de los cuerpos costeros más productivos de la costa noroccidental de México. La circulación natural del agua, mediante la cual el agua fría del fondo marino, rica en nutrientes, sube a la superficie, sustenta varias operaciones redituables de acuicultura no contaminantes, pero que requieren de agua de alta calidad. La abundancia de ostión japonés, y otros moluscos, como almeja y mejillón, contribuyen a la productividad primaria y filtrado de metales pesados y, consecuentemente a la importancia económica de la bahía. Se estima que la producción anual de 2.500 toneladas métricas de moluscos (la mayor producción de acuicultura de un solo cuerpo de agua en México) es solamente del 40% de la capacidad actual, aproximadamente, y excede los dos millones de dólares anualmente. Las alrededor de 60 especies de crustáceos son importantes tanto comercial como ecológicamente, sirviendo como eslabón en la cadena alimenticia entre peces y aves. Más aun, la Bahía de San Quintín es área de desove y crianza de peces comerciales y es reconocida como una de las tres principales áreas para la reproducción de la anchoa septentrional en la costa oeste de la península de Baja California (Conservation Biology Institute & The Nature Conservancy, 2007).

### **2.2.3.3 Otras actividades**

La minería de sal y la extracción de piedras de playa también dependen de los recursos de la bahía, pero no han sido monitoreadas adecuadamente para conocer su impacto en los recursos costeros. La abundancia de alimento en torno a la costa de la Bahía de San Quintín atrae alrededor de 25.000 gansos pardos cada año, y la cacería anual es una tradición que se remonta muchos años atrás (Conservation Biology Institute & The Nature Conservancy, 2007).

#### **2.2.4 Recursos**

En este apartado, se describen, de manera muy general, los diferentes tipos de recursos de interés en el valle de San Quintín, para, posteriormente, ser abordados con mayor detalle en los capítulos subsecuentes.

##### **2.2.4.1 Hídricos**

Los recursos hídricos principales, por ser fuente de abastecimiento de agua para todos los usos consuntivos en el valle de San Quintín son tanto superficiales como subterráneos, sin embargo, estos últimos son los predominantes debido a que los primeros sólo disponen de agua ante la presencia de lluvias de consideración (Comisión Nacional del Agua, 2010). Por lo cual, es del acuífero local, San Quintín, de donde se obtiene la mayor proporción del agua requerida, lo que causa su sobre-explotación y el deterioro de la calidad de sus aguas a causa de la intrusión de agua de mar, por ser un acuífero costero.

Por otra parte, las fuentes superficiales consisten en manantiales y cinco arroyos, a saber, La Escopeta, Nueva York, Aguachiquita, San Simón y Santo Domingo, cuyo aporte a los usos consuntivos es mucho menor debido a su escasa disponibilidad de agua. En el capítulo III se abordan nuevamente y con mayor detalle estas fuentes hídricas.

##### **2.2.4.2 Energéticos no renovables**

El valle de San Quintín no cuenta con fuentes de recursos energéticos propias ni con infraestructura de abastecimiento y distribución, por lo que los combustibles que requiere son suministrados por tierra desde el norte del estado. Además, debido a la inexistencia de industrias en la región, los volúmenes de combustible que se suministran no son muy grandes. De igual manera, la electricidad necesaria es generada y transmitida desde el norte. Véase Capítulo IV.

##### **2.2.4.3 Energéticos renovables existentes**

Las fuentes de energía renovable de las que puede disponerse en la región son la energía solar y la eólica. En lo que refiere a energía geotérmica, pese al sabido y probado potencial de dicho recurso en la Península de Baja California, el valle de San Quintín no posee fuente alguna de este; solamente existen fuentes termales muy pequeñas y de baja entalpia en Ensenada, Puertecitos y San Felipe (Prol-Ledesma, 2010), pero éstas se encuentran muy retiradas de la zona de interés.

Sobre energía solar hay que mencionar que la radiación promedio en San Quintín se encuentra en torno a los 6 kilowatts-hora por metro cuadrado diario, según el Atlas de Irradiación Solar Global Anual de la República Mexicana, elaborado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas. Este es un

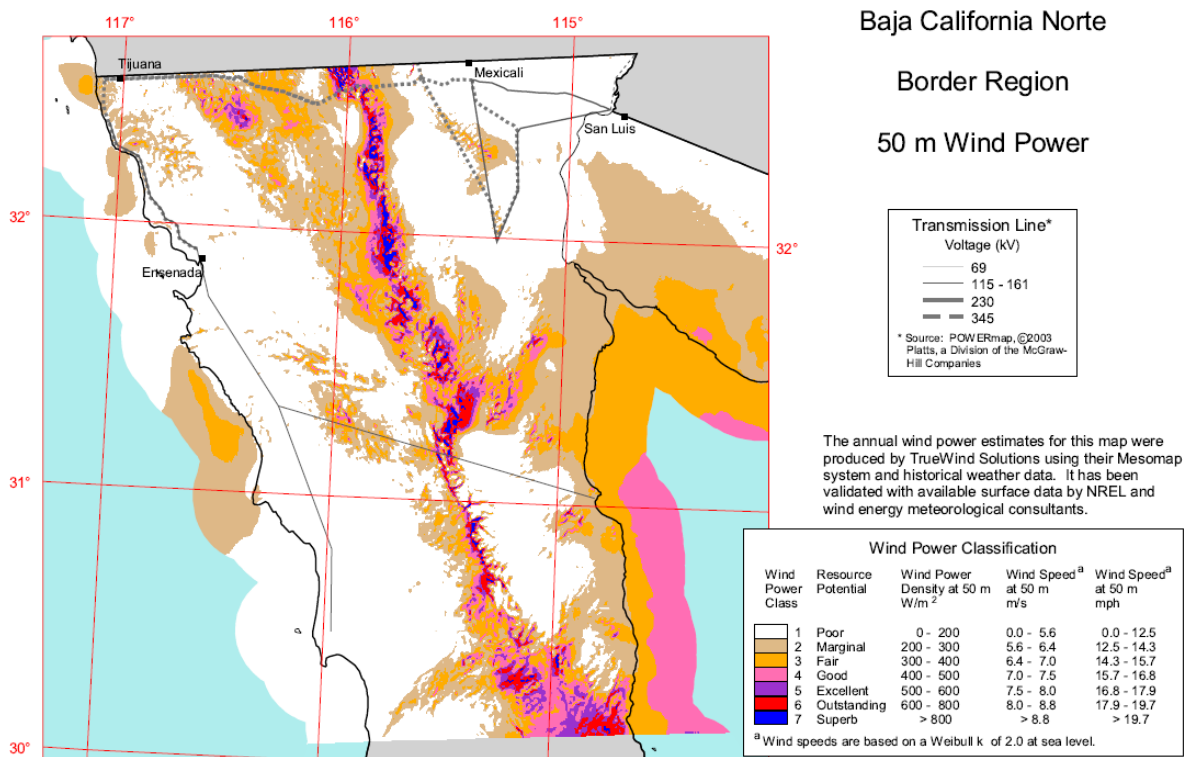


valor superior a la media de los países líderes en la materia, hasta 70% más alto que el que tienen los grandes desarrollos de aprovechamiento solar instalados en el mundo. Sin embargo, la tecnología necesaria para la explotación de esta energía aun requiere de un enorme desarrollo.

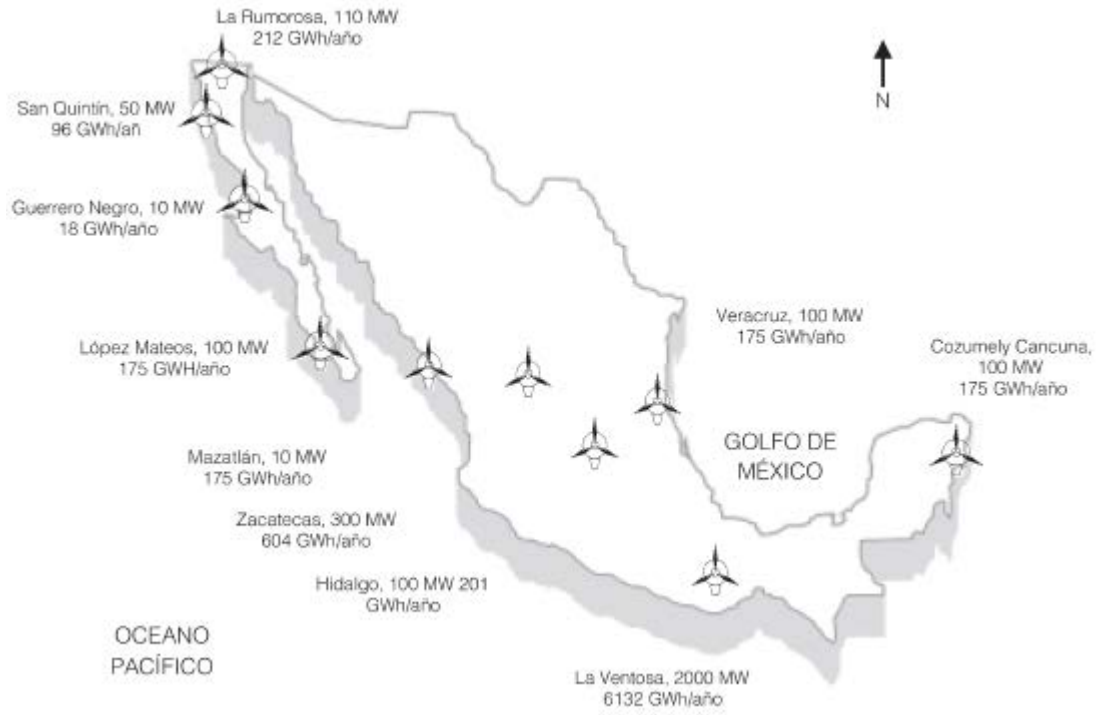
Tocante a energía eólica, a aproximadamente a 60 kilómetros al noreste del valle de San Quintín, se encuentra la Sierra de San Pedro Mártir, región que, como ya se mencionó, posee gran potencial para el desarrollo de proyectos de granjas eólicas, debido a la presencia de vientos con velocidades suficientes para generar cantidades considerables de electricidad.

En el mapa de la figura 2.7 se puede observar con mayor detalle el potencial eólico de la zona de estudio, el cual fue realizado por parte del Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos de América (NREL) conjuntando información de estaciones meteorológicas con técnicas de prospección remota.

Con base en los estudios existentes, la CFE tiene estimado un potencial de generación eléctrica en el valle de San Quintín, figura 2.8, del orden de los 50 MW y 96 GWh/año (González, Beltrán, Troyo, & Ortega, 2006).



**Figura 2.7** Potencial eólico de la región fronteriza de Baja California  
**Fuente:** National Renewable Energy Laboratory, USA, 2004



**Figura 2.8 Algunos sitios con potencial eólico en México**  
**Fuente: Comisión Federal de Electricidad**

# III. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

## 3.1 Contexto socio-económico

Al agrupar el valle de San Quintín a las tres localidades citadas, Vicente Guerrero, Lázaro Cárdenas y San Quintín, conforma el más grande centro poblacional entre la Ciudad de Ensenada y Ciudad Constitución, Baja California Sur, así como también una de las zonas agrícolas de mayor riqueza y crecimiento de Baja California. Esta industria agrícola expansiva ha atraído inmigrantes del México continental, con lo que la población del valle se incrementó a alrededor de 50.000 habitantes, como se menciona en el capítulo II, y que fueron traídos por un pequeño grupo de grandes cultivadores, de comunidades pobres mixtecas, zapotecas y triquis del estado de Oaxaca, así como también de los estados de Guerrero y Michoacán. A la cifra anterior se debe añadir 15.000 jornaleros agrícolas migrantes durante el periodo de cosecha, también referido en el capítulo pasado. Estos jornaleros se distribuyen en diversos campamentos agrícolas (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Delegación Estatal en Baja California, 2010), (Conservation Biology Institute & The Nature Conservancy, 2007). En un principio, las familias migrantes vivían en campamentos de trabajo y regresaban a sus hogares al final de la temporada de cosecha. Pero al transcurrir los años, muchos decidieron permanecer en el valle, y la demanda de vivienda se incrementó. Al crecer la población permanente, también creció el descontento ya que, en gran contraste a los ricos recursos agrícolas del valle, la gran parte de su población lleva una relativamente pobre calidad de vida en general, con agua, infraestructura y servicios comunitarios limitados. En 1988, alentados por organizaciones de derechos humanos, alrededor de 1.000 recolectores de jitomate y fresa organizaron una huelga para protestar por los bajos salarios, largas horas laborales y condiciones de vivienda antihigiénicas, generalmente viviendo en los arroyos. Sin embargo, sus esfuerzos para formar una

unión independiente fueron vencidos y los líderes de la huelga huyeron a los EE.UU. (Conservation Biology Institute & The Nature Conservancy, 2007).

Por otro lado, debido a su aislamiento relativo y clima inclemente, la bahía de San Quintín se ha salvado de las intensas presiones de desarrollo que han destruido la mayoría de las lagunas costeras y humedales en el sur de California, EE.UU. y en el norte de Baja California. Pero las oportunidades de recreación, combinadas con el relativamente bajo costo de propiedad de la tierra frente a la costa en Baja California, han comenzado a atraer a ciudadanos estadounidenses e inversiones al área, y tarde o temprano algún esquema de desarrollo será aprobado e implementado en la Bahía de San Quintín (Conservation Biology Institute & The Nature Conservancy, 2007).

En otro aspecto, el hecho de que el sector agrícola estatal demande el 92% del total del agua concesionada para usos consuntivos del estado, como se cita en el capítulo II, puede representar serias implicaciones socio-económicas en el mediano y largo plazo, pues dicha demanda es alarmantemente elevada, al ser muy superior al 72% que, se estima, es destinado a la agricultura a nivel mundial del total extraído para los principales usos, es decir, agricultura, industria y abastecimiento público; incluso resulta superior a la media nacional de 77% (Comisión Nacional del Agua, 2010). Este hecho puede tener como principales razones el bajo nivel de tecnificación del sector, pues emplea medios rudimentarios y de baja eficiencia para el abastecimiento y distribución del recurso y su aplicación, lo que favorece su pérdida durante su transporte y la necesidad de grandes volúmenes de agua para el riego de superficies reducidas (Muñoz Piña & Guevara Sanginés, 2006).

Por otro lado, la situación es agravada por muy diversos factores presentes no sólo en la zona de estudio sino en todo el país. El primero y quizá más importante, es que de acuerdo al artículo 224 de la Ley Federal de Derechos (Ley Federal de Derechos. Últimas Reformas, 2009), están exentos del pago por el uso del recurso, los usuarios agropecuarios, hasta por el volumen que a cada uno de ellos les haya asignado la Comisión Nacional del Agua. Aunque, de acuerdo a información oficial proporcionada, el agua que emplean los distritos y las unidades de riego de Baja California les es facturada a ocho pesos mexicanos por litro de agua en veinticuatro horas, en el caso de los primeros, en tanto que los segundos han de pagar catorce pesos por litro de agua en veinticuatro horas. Empero, dicha secretaria tiene calculada una cuota de autosuficiencia de dieciséis pesos por litro en veinticuatro horas para los distritos de riego, por lo que se estima que reciben un subsidio del 50% por parte de los gobiernos federal y estatal a través de diversos programas de apoyo directos a la infraestructura (Secretaría de Fomento Agropecuario del Estado de Baja California, 2010). En base a ello, podría suponerse que en el caso del costo real del agua para las unidades de riego sería de veintiocho pesos por litro en veinticuatro horas.

El siguiente factor de gran peso en el uso desmedido del recurso es el alto subsidio otorgado por el gobierno federal a las tarifas de la energía eléctrica destinada al bombeo del agua para riego, el cual llega a ser desde el 76% hasta el 88% de la tarifa normal (Presidencia de la República, 2010). Un estudio reciente (Muñoz Piña & Guevara Sanginés, 2006), analiza las consecuencias de los

subsidios tanto al agua para riego agrícola como a la electricidad para su bombeo, así como el impacto de suprimirlos.

Otro factor de influencia pudiera ser la decisión del tipo de cultivo a sembrar, atribución exclusiva de los productores que, en teoría, debiera estar en función de las condiciones de suelo, clima, disponibilidad de agua y recursos financieros (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2010); sin embargo, según el estudio antes citado (Muñoz Piña & Guevara Sanginés, 2006) podría pensarse que esta selección es realizada, principalmente, dejando en segundo nivel de importancia las consideraciones anteriores.

### **3.2 Necesidades de la región**

Las principales necesidades giran en torno a las actividades primarias, siendo la agricultura, como se citó anteriormente, la actividad de mayor importancia en esta región, y de la cual depende también su ganadería, al estar supeditada al cultivo de forrajes (Comisión Nacional del Agua, 2002).

Ya que la zona recibe poca precipitación y el agua superficial es limitada, los campos son irrigados con agua subterránea extraída del acuífero local. Por todo lo cual se tiene como principal necesidad el poder disponer de agua de buena calidad para riego agrícola, pues, como se ha mencionado, la calidad de este recurso en el acuífero San Quintín es mala a causa de la intrusión de agua salada en varias áreas, causada por su sobre-explotación.

Pese a ello, se sigue sembrando en el valle, aunque cada vez más hacia el este de la costa, en las faldas de la sierra, lo que ocasiona un círculo vicioso, como se ha dicho, porque ello implica que se siga extrayendo agua, manteniendo la sobre-explotación del acuífero y, por tanto, la intrusión salina, y con el empleo de esta agua con exceso de sales, se genera contaminación del suelo por salación, lo que con el tiempo puede traer la erosión de la zona consecuencia de la infertilidad y relativa sequedad superficial de la tierra, que permite que sea fácilmente volada por los fuertes vientos que se mueven desde el Océano Pacífico hacia tierra adentro, lo que posibilita también su inutilización para otros fines (Conservation Biology Institute & The Nature Conservancy, 2007) (Gobierno de Baja California, 2008).

Dado que este problema tiene varios años de haberse presentado, se han realizado algunos estudios, entre ellos uno que ha estimado que el suministro local de agua podría agotarse en menos de una década (Conservation Biology Institute & The Nature Conservancy, 2007), y otros que se mencionarán más adelante en este capítulo, para ir caracterizando la zona en cuestión y adquirir el conocimiento que permita diseñar las herramientas para crear los mecanismos y planes que ayuden a mejorar la situación y la calidad de vida de sus habitantes.

### **3.2.1 Agua para riego**

La calidad del agua para riego agrícola es un término que se utiliza para indicar la conveniencia o limitación del empleo del agua con fines de riego de cultivos, por lo que juega un papel importante sobre el manejo de láminas, frecuencias de riego y tratamiento a dársele para optimizar su uso en el caso de sistemas de riego presurizado, por lo que ésta tiene un peso importante en la demanda del recurso.

Para la determinación de la calidad del agua, generalmente se toman como base las características químicas, pero, en la actualidad, también resulta relevante considerar las características físicas y biológicas así como la tolerancia de los cultivos a las sales, las propiedades del suelo, las condiciones de manejo de suelo y agua y las condiciones climatológicas, sobre todo cuando se emplean sistemas de riego como el de goteo, micro-aspersión o aspersión.

#### **3.2.1.1 Sistema de riego**

Del total de superficie de riego, 16.062 hectáreas, casi la totalidad de ésta es irrigada mediante sistema de goteo, siendo 15.911,5 hectáreas; 136 hectáreas se riegan por aspersión y sólo 14,5 hectáreas por gravedad (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Delegación Estatal en Baja California, 2010).

Por otro lado, la infraestructura hidráulica para abastecimiento y distribución comprende la infraestructura de cabeza, de red mayor y de red menor. La primera la conserva y mantiene la Comisión Nacional del Agua, mientras que las dos últimas están a cargo de los usuarios beneficiarios de las unidades de riego. En términos generales, la infraestructura se encuentra con un grado de deterioro grave, por lo cual, su eficiencia se encuentra en el orden del 85%, con tendencia a la baja por su propio desgaste (Secretaría de Fomento Agropecuario del Estado de Baja California, 2010).

#### **3.2.1.2 Demanda por cultivo**

La demanda específica de agua de cada cultivo, es conocida como lámina de riego y es una cantidad, expresada en metros e independiente de la superficie sembrada, que permite obtener un valor de volumen de agua necesario durante todo el ciclo de cierto cultivo. Así pues, la multiplicación de la lámina de riego por la superficie sembrada dará el volumen de agua que un cultivo en específico requiere desde que es sembrado hasta que es cosechado. El valor de la lámina de riego es función de los parámetros climatológicos y topográficos propios de la región en la que se desee sembrar, por lo que para la zona de estudio de este trabajo se muestran en la tabla A.1 del *Apéndice A*, los cultivos sembrados y sus respectivas láminas de riego. Dichos datos fueron obtenidos de distintas instancias gubernamentales, tanto federales, estatales e incluso locales.

En el capítulo VI se presenta más a fondo las estimaciones de los volúmenes de agua demandados por los cultivos sembrados en San Quintín.

### **3.2.1.3 Demanda por Unidad de Riego**

A partir de los datos de láminas de riego, de la superficie de riego sembrada de cada cultivo y con el tamaño promedio de las unidades de riego se puede determinar un volumen de agua aproximado necesario para el riego agrícola en cada unidad de riego del valle de San Quintín.

El tamaño de las unidades de riego de la entidad oscila entre las 20 y las 80 hectáreas (Secretaría de Fomento Agropecuario del Estado de Baja California, 2010), pero, para los fines de este trabajo, se consideró que el tamaño promedio de éstas en la zona de estudio es de 20 hectáreas, que es el promedio del rango primeramente citado.

Una estimación hecha en este trabajo, con los datos disponibles sobre las láminas de riego y la superficie sembrada de cada cultivo, y con el tamaño promedio de las unidades de riego, muestra que, para una de estas unidades, del tamaño promedio supuesto, se requerirían de 1.466 metros cúbicos diarios de agua o 17 litros por segundo. Esta cifra tan considerable, sin embargo, es válida sólo bajo el supuesto de que el total de la superficie de la unidad fuera regada en el mismo instante, situación muy poco probable debido, en parte, al calendario de riego específico de cada cultivo, como se abordará también en el capítulo VI.

## **3.3 Análisis de fuentes alternas probables de agua para riego**

### **3.3.1 Subterráneas**

El acuífero San Quintín suministra no sólo prácticamente toda el agua que se requiere en la zona en cuestión (Comisión Nacional del Agua, 2010), sino también una parte de la demandada por Camalú, área agrícola localizada al norte de San Quintín que de manera creciente ha dependido del agua extraída y transportada de dicho acuífero (Aguirre-Muñoz & Buddemeier, 2001), lo cual ha provocado la sobre-explotación de esta fuente.

Pertenece a la Región Hidrológica No. 1 y se encuentra localizado dentro de la Cuenca Arroyo Escopeta-Cerro San Fernando, que cubre prácticamente toda el área, y la Cuenca Arroyo Las Animas-Santo Domingo, que comprende el extremo norte de la zona, abarcando una superficie de 971 km<sup>2</sup>, que equivalen al 1,3% del territorio estatal (Comisión Nacional del Agua, 2002), en un valle costero, por lo que descarga al mar, figura 3.1. El área está compuesta, a su vez, por dos subcuencas hidrológicas principales, Acuífero de San Simón y los arroyos que drenan a la zona de San Quintín, mostradas en la figura 3.2.



Figura 3.1 Cuencas Hidrológicas del valle de San Quintín  
 Fuente: Fuente: OEIDRUS, Gobierno del Estado de Baja California, 2010



Figura 3.2 Subcuencas Hidrológicas del valle de San Quintín  
 Fuente: OEIDRUS, Gobierno del Estado de Baja California, 2010

El área del acuífero corresponde con una cuenca abierta, delimitada hacia el sureste por las Mesas San Simón y El Pabellón, y es drenada por los arroyos intermitentes Padre Kino, La Escopeta, Las Palomas y Agua Chiquita. Geográficamente, dicha área se ubica dentro de la poligonal mostrada en la figura 3.3 (Comisión Nacional del Agua, 2002).



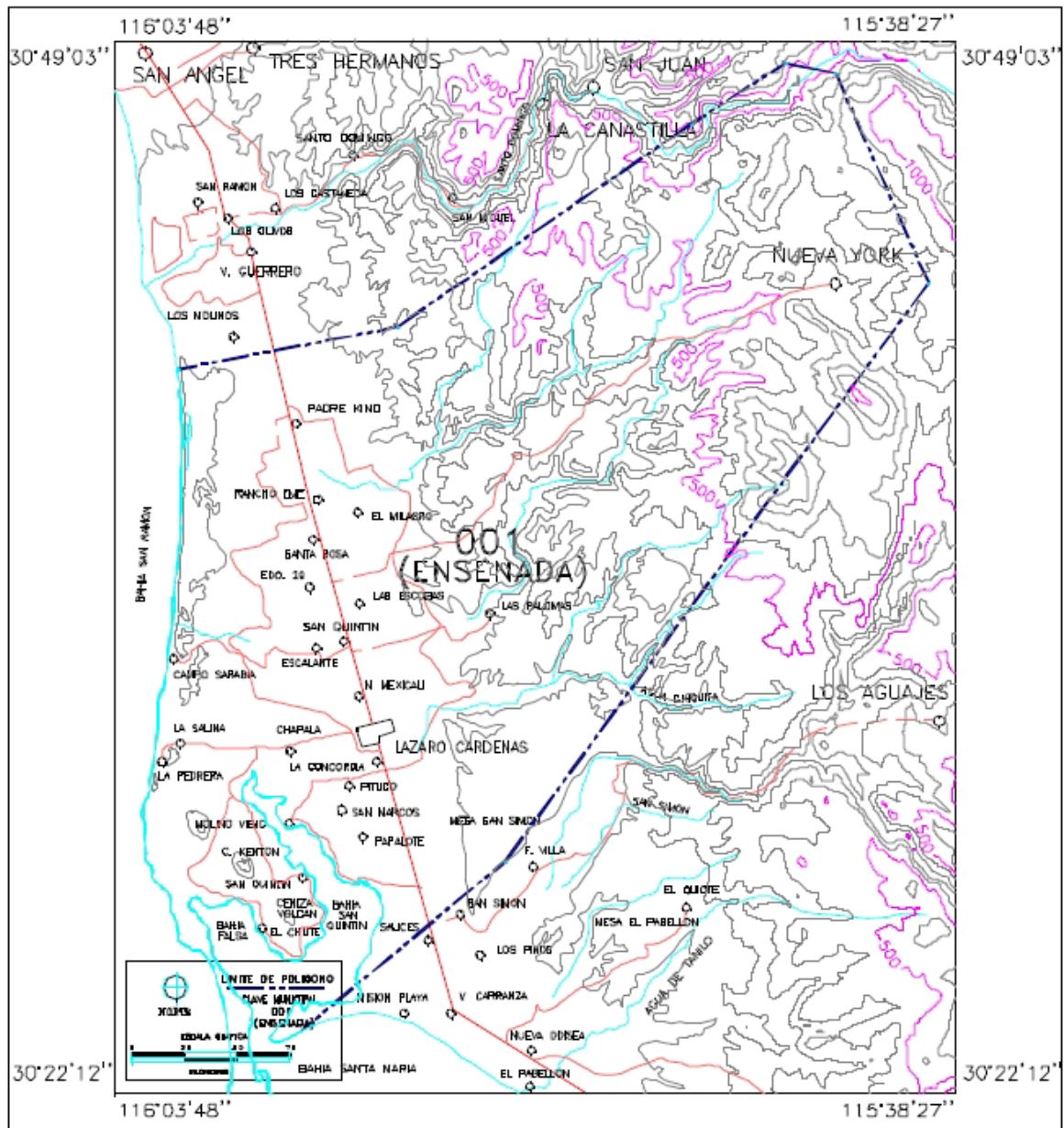


Figura 3.3 Plano del Acuífero de San Quintín  
 Fuente: CONAGUA, 2002

Este acuífero presenta las mismas características generales que el resto de los del estado, es decir, que debido a lo juvenil de su fisiografía, a la composición geología de la zona, a la ubicación geográfica y a la escasa precipitación, su potencial es limitado y es desde hace más de 40 años que se encuentra sobre-explotado, al tener actualmente una recarga media anual de 19,10 hm<sup>3</sup>/año y

una extracción de 24,40 hm<sup>3</sup>/año, lo que da un déficit de 5,30 hm<sup>3</sup>/año y que afecta de manera negativa la calidad de su agua, ya que por ser un acuífero costero, su sobre-explotación causa la intrusión de agua de mar, lo que podría llevarlo a niveles de calidad no aptos ni para consumo humano ni para riego agrícola, situación que ya se ha presentado en algunos de sus pozos (Comisión Estatal del Agua de Baja California, 2008).

Se desconoce con exactitud la calidad de sus aguas debido a la inexistencia de estudios detallados. Sin embargo, la única información disponible al respecto es la proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), sobre unos estudios, el más reciente del año 1996, que indican que la calidad del agua del acuífero San Quintín ha tenido un fuerte deterioro consecuencia de la sobre-explotación, por lo que los niveles actuales de salinidad seguramente serán iguales o incluso mayores a los proporcionados. No obstante, se determinó el gradiente de concentración de sales que es mayor en la cercanía a la costa, en donde los niveles alcanzan las 9.000 ppm en la porción norte del valle, mientras que en la parte sur su valor llega hasta las 32.000, con un promedio de 3.000 ppm (Comisión Nacional del Agua, 2010).

A partir de 1975 comenzaron a realizarse estudios en el valle de San Quintín, uno de los cuales tenía como objetivo el realizar un modelo matemático para analizar el comportamiento de su acuífero ante diversas alternativas de explotación, con la finalidad de buscar su recuperación parcial y evitar que continuase el deterioro causado por la intrusión salina. Como resultado fue definido que está compuesto de material granular sedimentario marino aluvión y depósitos fluviales, con una base de material arcilloso, y que presenta un alto arcilloso que lo hace independiente del valle de San Simón. Es un acuífero libre muy sensible a la recarga que se presenta en forma muy errática (Comisión Nacional del Agua, 2002).

Algunos resultados de otro estudio realizado en 1996, delimitaron la profundidad del nivel freático, y detectaron la intrusión salina hacia la parte central del valle; también se determinó la recuperación media anual en 0,11 m, el abatimiento es en 75,65 km<sup>2</sup>; el volumen anual de agua subterránea como reserva aprovechable de regular calidad es de 631.376 hm<sup>3</sup>, mientras que se tiene un volumen de agua de 225.948 hm<sup>3</sup> con elevada concentración de sales (Comisión Nacional del Agua, 2002).

### **3.3.2 Superficiales**

Como se introdujo en el capítulo anterior, en el valle de San Quintín existen arroyos y manantiales de carácter intermitente, por lo que su contribución a los usos consuntivos es mucho menor que el acuífero San Quintín. Mientras que los manantiales que se forman, estacionalmente, son empleados con fines de abrevadero. (Comisión Nacional del Agua, 2010).

De los cinco arroyos, La Escopeta, Nueva York, Aguachiquita, San Simón y Santo Domingo, son los ríos Santo Domingo y San Simón los que representan las corrientes principales que drenan la llanura y que, al ser corrientes de régimen torrencial, permanecen secos durante todo el año,

pudiéndose presentar torrentes violentos durante las épocas de lluvia (Comisión Nacional del Agua, 2002). Por su parte, los arroyos Padre Kino, La Escopeta, Las Palomas y Aguachiquita, como se citó en el subtema anterior, son los que drenan la cuenca abierta del área donde se ubica el acuífero San Quintín. Dichos arroyos nacen en lo alto de la Sierra de San Pedro Mártir, ubicada al oriente de la zona de estudio.

Con este panorama se concluye que estas fuentes no son candidatos que puedan cumplir con los fines propuestos.

### **3.3.3 Desalación**

Debido a la desigual distribución del agua dulce en la superficie terrestre y por las características particulares de cada región del planeta, resultado de su localización geográfica, existen países cuya disponibilidad del recurso es muy limitada, y si a ello se le añade la contaminación de las pocas fuentes existentes y el crecimiento poblacional, su escasez y encarecimiento es aún mayor. La localidad estudiada en este trabajo, valle de San Quintín, concuerda con la descripción anterior, debido a que las fuentes naturales de agua, desde un inicio muy limitadas, han sido sobre-explotadas y contaminadas hasta prácticamente ser agotadas como consecuencia de un mal uso.

En los últimos años ha habido una considerable reducción en los costos de la desalación de agua, mientras que su potabilización por tratamientos convencionales puede llegar a resultar más cara debido precisamente a la sobre-explotación de los acuíferos, la contaminación de las aguas subterráneas por muy diversos agentes y la intrusión salina (Alarcón, Blanco, & Zarza, 2002). Por lo que ahora la desalación de agua ya se emplea no solo con miras industriales o de consumo humano, sino también para riego agrícola, principalmente en la agricultura de alto valor añadido y, aunque puede parecer un agua muy costosa para esos fines, en comparación con la obtención por otros métodos o de forma natural, resulta más cara aún el agua que no se tiene. Esto fue lo que motivó a España a destinar el 29,55% del total de agua que diariamente desalaba, por lo menos hasta el año 2000 alrededor de 1,2 millones de metros cúbicos (Valero, Uche, & Serra, 2001) (Torres Corral, 2004), pese al sobre-costo que implica el proceso de desalación. En 2004 se tenía contemplada la construcción de más complejos de desalación para aplicación agrícola en dicho país (Torres Corral, 2004).

En otro aspecto, las plantas desaladoras pueden emplear agua de mar, aguas subterráneas de acuíferos salobres más o menos profundos o aguas superficiales procedentes de humedales o salinas. Y a este respecto es muy importante mencionar que en la desalación de agua salobre por ósmosis inversa, proceso descrito en el capítulo V, se ha encontrado que ésta representa un impacto ambiental, a escalas local y global, cincuenta por ciento menor respecto al caso de agua de mar por dos factores, el primero de los cuales es que el menor contenido de sales en el agua de alimentación implica un consumo eléctrico mucho más bajo, con lo que se reduce en casi la mitad la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera por cada metro cúbico de agua desalada y, en segundo lugar, dicho menor contenido de sal significa que su concentración en la salmuera

desechada será igualmente menor, similar a la que tiene el mar, causando un menor desequilibrio ecológico al entorno al ser descargada (Muñoz & Fernández-Alba, 2008).

### **3.4 Propuesta**

Analizando toda la información presentada en el capítulo II anterior y en los temas antecedentes del actual, queda muy claro que no existen fuentes alternas de agua en la zona de estudio, además de que el aprovechamiento de las actuales está muy restringido debido a sus problemas de escasez y calidad, lo que obliga a pensar en fuentes no convencionales para proveerse de este recurso, primeramente tratando de sacar el mayor provecho de los recursos con los que se cuenta y, en caso de no ser suficientes, recurriendo entonces a medios externos, con plena consciencia del consecuente incremento en los costos en los que habrá de incurrirse para satisfacer las necesidades existentes.

Lo que en este trabajo se propone consiste en obtener agua para riego agrícola a partir de la desalación del agua salobre de pozo del acuífero de San Quintín, ya que ésta es un medio de abastecimiento totalmente alternativo, con el que se podría reducir la presión a las fuentes comunes, y muy bien adaptable a las características de la zona, con lo que se contribuiría adicionalmente a aminorar el deterioro del ecosistema, debido a que no se requerirá extraer volúmenes adicionales de agua para lavar la tierra como comúnmente se hace para eliminar o disminuir los altos contenidos de sales que pueda tener y que la contaminan, consecuencia del empleo de agua salobre en riego (Comisión Estatal del Agua de Baja California, 2008). Todo esto traería también consigo beneficios en otros ámbitos como el económico y el social.

No se considera al agua de mar como agua de alimentación a la planta por lo expuesto en el apartado que antecede al presente, respecto a las ventajas del empleo de agua salobre, y también porque el hacerlo implicaría la construcción de infraestructura adicional para su transporte desde la costa hasta la zona de estudio, siendo que en este último lugar actualmente ya se cuenta con la necesaria para su extracción desde los pozos y su transporte hasta donde se le es requerida. A esta razón se sumarán otras que resultan del desarrollo de este trabajo.

Para ser propuesta como una fuente de agua confiable, la desalación de agua requiere forzosamente de un suministro de energía constante, de modo que, antes de elegir el proceso de desalación, es necesario evaluar cuidadosamente las fuentes de energía existentes para poder seleccionar la que resulte no sólo más económica, sino también que sea técnica y logísticamente más viable y, además, que sea sustentable, ya que cada día la conciencia y el interés por la preservación de la naturaleza va cobrando mayor peso en las decisiones de los consumidores finales y de los inversionistas, en todos los sectores. En el capítulo siguiente se abordará

ampliamente el tema de los energéticos disponibles a nivel estatal y local, para que una vez eligiéndolo, se tome éste en cuenta en la selección de la tecnología de desalación más adecuada.

### **3.4.1 Antecedentes**

El gobierno de Baja California, en su Plan Estatal de Desarrollo 2008-2013, plantea la necesidad de contar con fuentes de agua potable alternas a las convencionales para satisfacer la demanda que las distintas actividades usuarias tienen del recurso, pues dicha necesidad día con día continúa incrementándose, a razón del acelerado crecimiento poblacional, cuyo principal motor es la gran inmigración proveniente de otros estados del país en la búsqueda de mejores condiciones de vida, ocupándose un gran porcentaje de tal flujo migratorio en actividades del sector agrícola, actividad económica a la que se destina el 92% de la extracción total estatal de agua, cifra que resulta demasiado elevada por lo expuesto al inicio del presente capítulo, y que puede ser consecuencia de prácticas no sustentables tanto en el manejo y uso del recurso como en la selección de los cultivos a producir. Todos esos factores conjuntados ocasionan grandes presiones sobre los recursos agua y energía, tendencia que seguirá en aumento y que, en el caso del primero, debido a la limitada cantidad de fuentes de agua existentes en la entidad consecuencia de su localización geográfica, resulte ser estratégico para el desarrollo social y económico local. Ante este panorama, el gobierno bajacaliforniano ha visto en la desalación de agua un medio alternativo de obtención de agua potable que se ajusta a las necesidades del estado.

El tema de la desalación de agua para consumo humano no es nuevo. Se puede hablar propiamente de una instalación desaladora de naturaleza estable hasta bien entrado el siglo XIX, cuando ya se recurría a este medio para satisfacer las necesidades de agua en lugares y situaciones con carencia del recurso. Es por ello que se vienen realizando esfuerzos desde hace varios años en diversas áreas para hacer de las diferentes tecnologías de desalación de agua un medio más viable, seguro y adaptable a las necesidades particulares del interesado, de tal manera que hoy en día, adicionalmente a dichas mejoras en sus características, se han logrado importantes reducciones en los costos tanto de inversión como de operación y mantenimiento, por lo que el precio unitario del metro cúbico de agua desalada también ha disminuido como consecuencia de adelantos tecnológicos en los procesos en general o en sus componentes, lo que permite, además, obtener variadas calidades de agua dependiendo de los requerimientos específicos o uso final.

No obstante, estos procesos de obtención de agua potable no están exentos de causar daños medioambientales, pues el contaminante que es común denominador para cualquier tecnología de desalación es la salmuera descargada al entorno, mientras que las tecnologías térmicas, además, emiten gases de efecto invernadero producto de la combustión llevada a cabo para producir el calor necesario para su funcionamiento. Los procesos de membranas tienen una fuerte demanda de electricidad, cuya generación mayoritaria en México es también a partir de la quema de combustibles. En general, puede decirse que se requiere quemar un litro de petróleo para generar calor o electricidad, para producir un metro cúbico de agua desalada (Hiriart, 2006). Estas

desventajas podrían poner en duda la justificación del empleo de la desalación de agua para satisfacer la demanda por el recurso, excepto en contextos como el de la zona de estudio, en donde ya no puede disponerse de agua de las fuentes existentes y no se cuentan con otras alternativas. Dichas desventajas también han despertado el interés en acoplar los procesos de desalación de agua a fuentes renovables de energía, sobre todo por el hecho de que, en la mayoría de las regiones donde se carece de una fuente de agua potable, se cuenta con grandes recursos renovables, lo que hace del empleo de este tipo de energías para desalación de agua una opción interesante, e inclusive el único medio para proporcionar una fuente segura de agua potable (García-Rodríguez, 2003).

En dicho sentido y como se mencionó en el capítulo II, pese a que México es un país exportador de petróleo, importa gran parte de los productos derivados de éste que requiere, como gas natural, gasolinas y diesel, siendo la Península de Baja California destino para una porción de tales importaciones al no existir ninguna fuente natural de éstos. Pero esta gran deficiencia es por mucho compensada por su abundante potencial de energías renovables, y las tecnologías de explotación son cada día más eficientes y menos costosas, por lo que pueden llegar a competir con las energías convencionales bajo contextos geográficos favorables.

### **3.4.2 Objetivo**

La propuesta que se plantea es una planta desaladora de agua para riego agrícola que coadyuve al desarrollo de ese sector, principal actividad económica de la zona de estudio, al suministrar una proporción del agua para riego que demandada, de buena calidad, de manera económica y financieramente viable, con lo cual se estimule, a su vez, la mejora en la calidad de vida de sus habitantes y causando el menor impacto ambiental posible debido a su operación, lo que coadyuvaría también a la preservación de los recursos naturales de la región.

# **IV. REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS Y SELECCIÓN DEL RECURSO ENERGÉTICO**

Si puede decirse, en general, que se requiere quemar un litro de petróleo para generar calor o electricidad, para producir un metro cúbico de agua desalada (Hiriart, 2006), resulta entonces evidente la importancia de la adecuada selección del recurso energético a emplear para alimentar la planta desaladora con el menor consumo de energía si se quisieran producir, por ejemplo, los 1.400 metros cúbicos de agua desalada que demanda una unidad de riego promedio de 20 hectáreas, según se estimó en el capítulo pasado. Dicha selección fue realizada en el presente capítulo, para lo cual se desarrolló lo que a continuación se presenta.

## **4.1. Descripción general de la situación energética del estado y la zona de estudio**

Según las leyes mexicanas, el Estado Mexicano es el único que puede llevar a cabo las distintas explotaciones de hidrocarburos. Lo anterior ha de lograrlo por conducto de Petróleos Mexicanos y sus organismos subsidiarios. Empero, gracias a la reforma realizada a dicha ley en 2008, ahora es posible que el transporte, el almacenamiento y la distribución de gas puedan ser llevados a cabo por los sectores social y privado, que podrán construir, operar y ser propietarios de ductos, instalaciones y equipos, de acuerdo a las disposiciones reglamentarias, técnicas y de regulación

que se expidan (Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el ramo petrolero. Última Reforma DOR 28-11-08, 2008).

Sin embargo, dicha reforma no ha resultado ser suficiente para satisfacer las necesidades presentes y futuras de México. Pudiera ser, en parte, debido a lo anterior, que en Baja California, al igual que en el resto del país, no se cuente con la suficiente infraestructura en el ramo energético. Más aun, la zona de estudio, al igual que todo el estado, carece de fuentes propias de energéticos, por lo que todos deben ser transportarse desde otros estados del país y desde el extranjero.

En el caso de las importaciones de los energéticos que el país requiere y que se pagan a precios internacionales, lo que representa una desventaja para la moneda mexicana por el precio devaluado que tiene en los mercados mundiales, el gobierno otorga subsidios al consumo energético que representan montos significativos y que desincentivan el consumo eficiente. Del monto promedio anual de los subsidios en el periodo 2005-2009, el 63% fue destinado a la electricidad, 31% a la gasolina y el diesel, y 6% al gas LP. En 2008, los subsidios alcanzaron un máximo histórico de 392 mil millones de pesos (Secretaría de Energía, 2010). Sin embargo, tales subsidios han comenzado a disminuir, por lo menos para la gasolina y el diesel, con lo que los precios de venta final han estado aumentando en los últimos tiempos y se espera que esta tendencia continúe en el futuro.

#### **4.1.1 Combustibles fósiles**

Los energéticos requeridos en la entidad son importados desde el Puerto de Salina Cruz, Oaxaca, a aproximadamente 2.400 km de distancia; Manzanillo, Colima; o desde el extranjero, por medio de buques-tanque o de ductos, hasta las terminales de almacenamiento y reparto del estado y desde donde se distribuye al resto del estado (Secretaría de Energía, 2009).

La infraestructura para abastecimiento, transporte y distribución de energéticos con la que cuenta el estado consiste de un sistema de transporte de hidrocarburos en la zona fronteriza con EE.UU., conformada por una red de gasoductos constituida por pequeños ramales de ductos provenientes de California, EE.UU., desde donde se importa gas natural a través de tres interconexiones; y una red de poliductos, que comunican a la terminal marítima, de almacenamiento y reparto en Rosarito, con las de almacenamiento y reparto en Ensenada y Mexicali. Con estas terminales y redes de ductos son alimentadas las plantas de generación eléctrica del estado y el sector industrial, y es desde donde se distribuyen los energéticos a sus respectivas áreas de influencia, pues es en dichas ciudades en donde se concentra casi la mayoría de la población estatal, por lo que en las localidades hacia el sur de la entidad, casi todas rurales y cuyo número de habitantes no es comparable a las primeras, no se cuenta con grandes obras de infraestructura para transporte y distribución de hidrocarburos, solamente son empleados auto-tanques o pipas. Por último se tiene una estación de regasificación de gas natural en Ensenada, primera en su tipo en la costa del Pacífico de América.



Pemex Refinación es el encargado del abastecimiento de los productos de petróleo requeridos, para lo cual emplea buques-tanque que arriban a la Terminal de Almacenamiento y Reparto de Rosarito, de donde se distribuyen al área de influencia de dicha terminal por medio de auto-tanques y desde donde son también transportados a terminales similares en Ensenada y Mexicali por medio de poliductos, para que éstas a su vez atiendan sus áreas de influencia con el empleo de auto-tanques. El valle de San Quintín está en la zona de influencia de Ensenada (Pemex Refinación. Subdirección de distribución. Gerencia de operaciones, 2010), (Pemex Refinación. Subdirección de Almacenamiento y Reparto. Gerencia de almacenamiento y reparto Pacífico, 2010).

El abastecimiento de gas natural es una labor realizada principalmente por Pemex Gas y Petroquímica Básica y, en menor medida, por el sector privado, quienes importan en su totalidad este producto desde EE.UU. (Pemex Gas y Petroquímica Básica. Subdirección de Gas Natural, 2010), (Grupo de Trabajo de Energía para América del Norte / Grupo de Trabajo de la Alianza para la Seguridad y la Prosperidad de América del Norte, 2006) a través de tres interconexiones transfronterizas de ductos que conforman el principal sistema de suministro de este energético al estado, estando éstas en Los Algodones, Mexicali y Tijuana. El gasoducto de Los Algodones y el de Tijuana son operados por la subsidiaria de Pemex (Pemex Gas y Petroquímica Básica. Subdirección de Gas Natural, 2010), (Grupo de Trabajo de Energía para América del Norte / Grupo de Trabajo de la Alianza para la Seguridad y la Prosperidad de América del Norte, 2006). El sector privado también importa gas natural desde Asia por medio de buques-tanque que abastecen a una estación de regasificación en Ensenada, con la cual se espera satisfacer la demanda regional y también exportar a Arizona, EE.UU.

En lo que respecta al gas licuado de petróleo, éste también es importado totalmente de EE.UU., principalmente por Pemex Gas y Petroquímica Básica, quien se encarga de transportarlo hasta plantas de suministro para ser distribuido a toda la entidad únicamente por sus clientes-distribuidores, ya que la paraestatal sólo cuenta con permisos para almacenamiento, por lo que, a través de ventas de primera mano, se enajena el gas LP en la modalidad de Libre A Bordo (LAB) (Pemex Gas y Petroquímica Básica. Subdirección de Gas Licuado y Petroquímicos Básicos, 2010).

En resumen, todos los combustibles fósiles necesarios en el valle de San Quintín son suministrados únicamente por medio de auto-tanques, cuyo empleo genera los costos más elevados en materia de transporte y distribución, al ser el medio más caro de todos, como se muestra más adelante en el presente capítulo en el apartado 4.1.4.2.1 *Análisis cuantitativo de las energías convencionales*.

## **4.1.2 Electricidad**

### **4.1.2.1 Situación del sistema eléctrico estatal**

Hablando en términos eléctricos, las dos entidades de la Península de Baja California son islas casi completamente independientes, debido a que el sistema eléctrico estatal no está conectado al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Por el contrario, sí está totalmente integrado a uno de los

sistemas de EE.UU., el Western Electricity Coordinating Council (WECC), en el área de California. El área noroeste se había operado desde hace años de manera independiente por razones de estabilidad, pese a que ya existían enlaces al área norte y a la occidental, hasta que se interconectó de manera permanente con el resto del sistema en marzo de 2005, lo que ha permitido grandes ahorros en generación eléctrica y evitar afectaciones locales de carga en el noroeste y norte. Por otro lado, a partir de estudios realizados se ha encontrado conveniente interconectar la Península de Baja California al Sistema Interconectado Nacional, pues esto permitiría compartir recursos de generación del sistema para atender la demanda de punta en dichas áreas y realizar transacciones de potencia y energía entre el SIN y el WECC (Secretaría de Energía, 2009).

El sistema eléctrico estatal está conformado por una red troncal que comprende a las líneas de transmisión y a las centrales generadoras, figura 4.1. Atiende a las localidades ubicadas en la región norte de la entidad, incluidas Ensenada y algunas del estado de Sonora que colindan con Baja California; y, hacia el sur, a las de la costa del Pacífico, siendo San Quintín la penúltima y San Simón la última. Atraviesa también la Sierra de San Pedro Mártir hacia la costa del Mar de Cortés para atender un par de pequeñas localidades en ese extremo, también mostrado en la figura 4.1. Las centrales generadoras son de ciclo combinado, turbogas, geotermia y viento, siendo las de combustión las más abundantes. Prácticamente todas las plantas se ubican en la zona fronteriza con los EE.UU. por ser dicha región el principal centro de consumo, por lo cual la red troncal queda subdividida en dos redes (figura 4.1), una de 230 kV que abastece a tal zona de gran demanda, mostrada en la figura 4.2, y otra de 115 kV que atiende a la región costera en el centro y sur de la entidad y que tiene menor demanda debido al reducido tamaño de los poblados y por la carencia de industria, como lo es el caso de San Quintín, figura 4.3. El punto de interconexión de ambas redes es la central de turbogas y subestación, Ciprés, ubicada en Ensenada, desde donde se transmite a la subestación San Quintín.

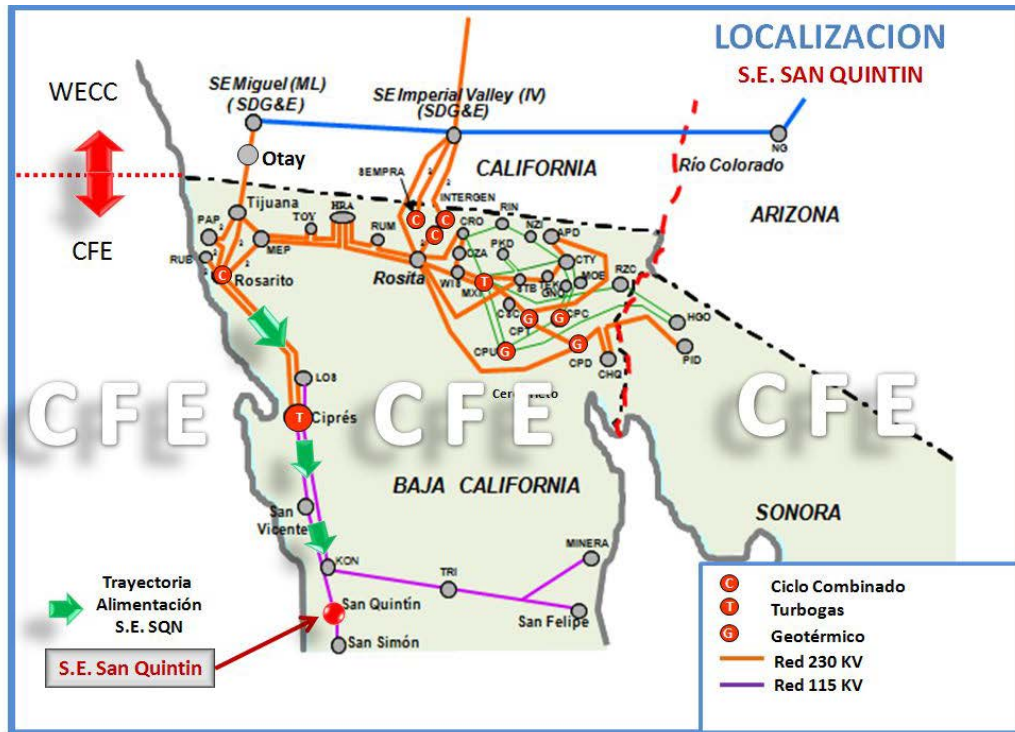


Figura 4.1 Sistema eléctrico del norte de Baja California.  
Fuente: Comisión Federal de Electricidad, 2010

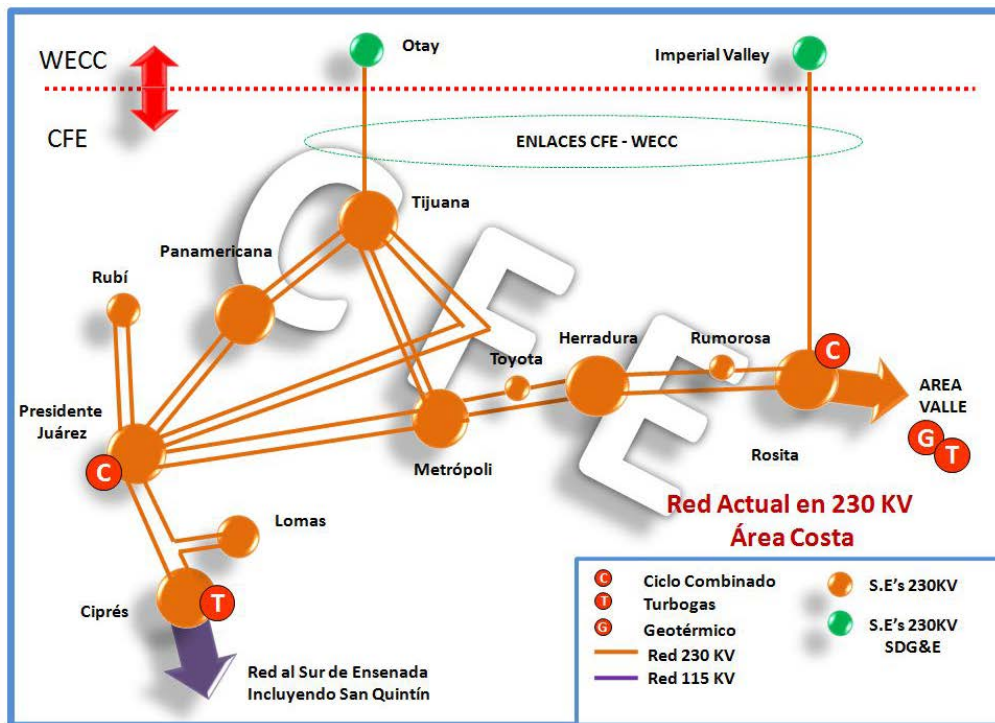


Figura 4.2 Red eléctrica actual, Área de Costa, en 230 kV  
Fuente: Comisión Federal de Electricidad, 2010

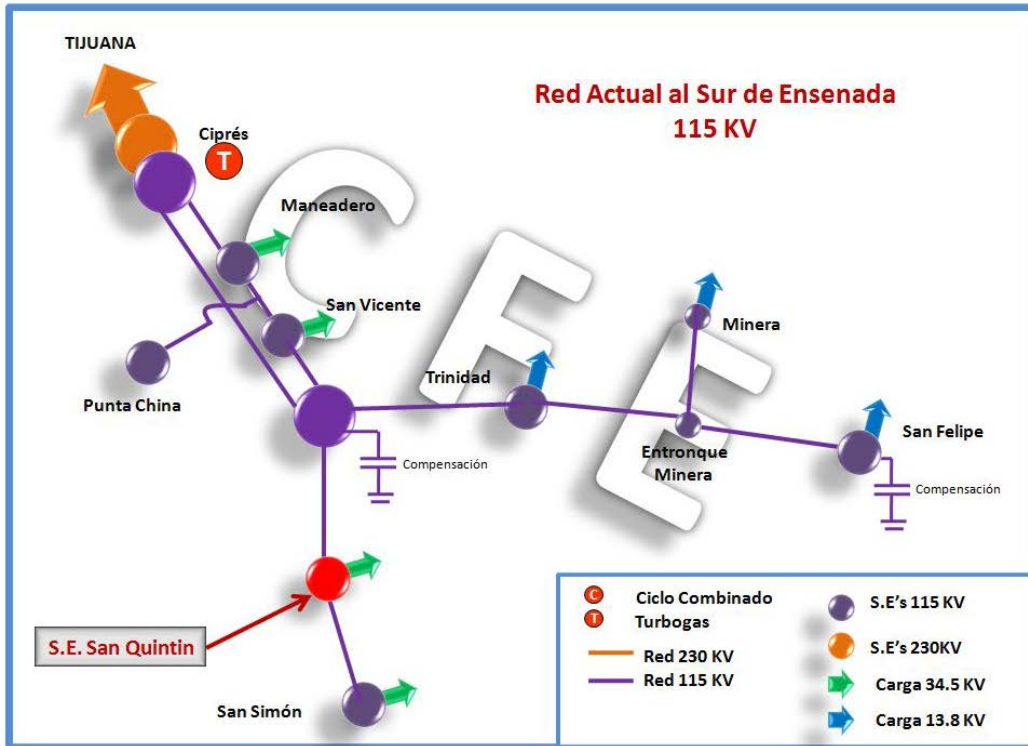


Figura 4.3 Red actual en 115 kV, al sur de Ensenada.  
Fuente: Comisión Federal de Electricidad, 2010

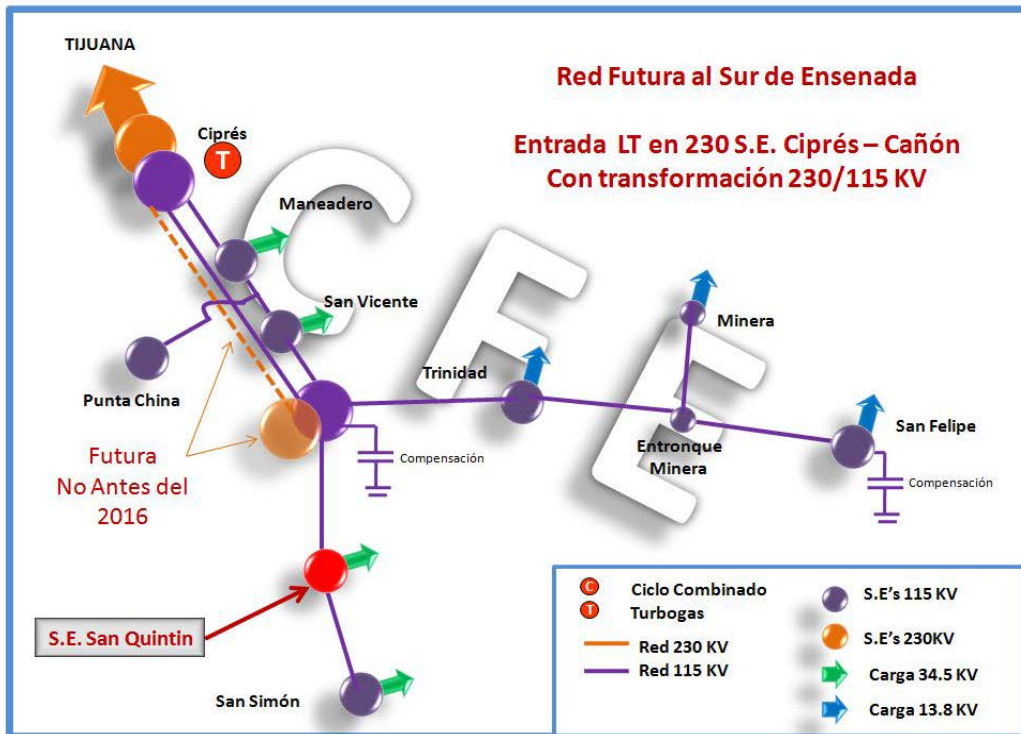


Figura 4.4 Red futura al Sur de Ensenada  
Fuente: Comisión Federal de Electricidad, 2010

### 4.1.3 Energías Renovables

#### 4.1.3.1 Energía geotérmica

Existen cinco tipos de recursos geotérmicos, cada uno asociado con tecnologías específicas para su aprovechamiento: (a) hidrotermales, (b) roca seca caliente, (c) geo-presurizados, (d) marinos y (e) magmáticos. Los hidrotermales son los que se explotan actualmente en México y en otros países, mientras que los otros cuatro se encuentran en proceso de investigación y desarrollo. A su vez, los recursos hidrotermales se dividen en recursos de alta entalpía y de baja entalpía. Los primeros se pueden utilizar para la generación de electricidad, mientras que los segundos se utilizan normalmente sólo para aplicaciones térmicas (Secretaría de Energía-Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, 2009).

La geotermia requiere de altos costos de inversión en exploración, perforación de pozos y en la construcción de la central propiamente dicha. Los costos de inversión, de generación eléctrica y para aplicaciones térmicas con esta tecnología se muestran en la tabla 4.1. Por lo que se refiere a las aplicaciones térmicas, actualmente se concentran mayormente en balnearios de aguas termales, aunque se reportan casos aislados de calefacción de edificios, secado de madera, invernaderos y cultivo de hongos (Secretaría de Energía-Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, 2009).

Los recursos geotérmicos de Baja California son principalmente de los tipos hidrotermales de baja entalpía, pues registran temperaturas de hasta 84°C, y marinos. Referente a los segundos, como se mencionó en el párrafo anterior, no podrían ser aun bien aprovechados por estar en investigación y desarrollo. Respecto a los primeros, y como se menciona en los apartados correspondientes a energías renovables de Baja California y el valle de San Quintín, del capítulo II, todas las fuentes geotérmicas de la entidad, tanto termales como marinas, se encuentran demasiado retiradas de la zona de estudio, además de que son muy pequeñas y requieren de mayor estudio para poder determinar si podrían satisfacer la demanda energética de la planta desaladora y para el diseño de la planta geotérmica, de acuerdo también a lo antes dicho. Más aun, y como fue mencionado, la geotermia demanda altos costos de inversión. En conclusión, los costos económicos y temporales del empleo de este recurso son muy elevados y le quitan toda viabilidad al proyecto que aquí se propone.

Costos para energía geotérmica	
Inversión	Uso
3.800 US\$/kW	Generación eléctrica 4 - 7 US¢/kWh Aplicaciones Térmicas 0,5 – 2 US¢/kWh <sup>/a/</sup>

<sup>/a/</sup> En el caso de la tecnología binaria

Tabla 4.1 Costos para energía geotérmica  
Fuente: SENER-GTZ, 2009

#### 4.1.3.2 Energía solar

El aprovechamiento de esta energía puede llevarse a cabo principalmente a través de dos tecnologías: fotovoltaicas y termosolares. La primera consiste en transformar la energía solar en eléctrica a través de paneles de celdas fotoeléctricas, y se puede utilizar en conexión con la red eléctrica o en sitios aislados, por medio de sistemas que incluyen baterías. Alcanza eficiencias de más de 15%. La segunda tecnología emplea colectores solares para captar la energía del Sol y con ella calentar fluidos de trabajo. Esta tecnología, a su vez, tiene dos variantes: Colectores solares planos, que alcanzan temperaturas de entre 40°C a 100°C y que comúnmente son empleados para calentar agua, cuya eficiencia típica oscila en torno a 50%, pero hay tecnologías con mayores eficiencias; y los concentradores, los cuales llegan a alcanzar hasta 500°C y eficiencias de más de 15% y entre cuyas aplicaciones se incluye la generación eléctrica y, mediante inversiones adicionales, ofrecen la ventaja de poder almacenar energía en forma de calor, para poder generar electricidad cuando no haya radiación solar (Secretaría de Energía-Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, 2009).

En cuanto a factibilidad técnica, bajo las condiciones de mercado y desarrollo tecnológico actual, el costo de la energía eléctrica producida con paneles solares es demasiado alto, y no se espera que durante los próximos años los precios de la energía eléctrica generada a partir del sol puedan ser completamente competitivos con los precios de la energía generada con tecnologías convencionales, debido a que los componentes de los paneles son caros y la eficiencia de conversión de la energía solar en electricidad es muy baja, por lo que, adicionalmente, se requeriría de extensiones de terreno considerables para ubicar los paneles o concentradores y conseguir la capacidad de generación adecuada. Aunque sí pudieran serlo con los precios de la electricidad comercializada en las tarifas más altas o al menudeo, en regiones cálidas y con alta incidencia solar, o bien en zonas aisladas y en aquellas donde el costo de transmisión y distribución de energía impide proporcionar el servicio (Secretaría de Energía, 2009). En el caso de regiones costeras, el buen funcionamiento y eficiencia de estas tecnologías está influido por las condiciones de la brisa marina, que acarrea consigo sales que se depositan en los espejos, requiriendo éstos un servicio de mantenimiento más frecuente que el uso alejado del mar.

Así, el potencial económico y financiero se limita a nichos específicos debido a los altos costos de las tecnologías. Para comunidades aisladas de la red eléctrica, el alto costo de extensión de la red implica que la tecnología fotovoltaica sea en la mayoría de los casos la más económica para satisfacer aplicaciones energéticas de alto valor y poco consumo de energía, tales como iluminación y aparatos electrónicos. Es este el caso de prácticamente todos los sistemas fotovoltaicos en México, donde se emplean para electrificación y telefonía, bombeo de agua y protección catódica, y muchos de ellos fueron instalados por medio de programas gubernamentales de electrificación rural, ya que esta tecnología no resulta aún viable frente al suministro de la red eléctrica, de manera general, debido principalmente a los altos subsidios que recibe la electricidad en el país así como por la estructura tarifaria de la misma, los aún elevados costos de los mismos sistemas y por el escaso financiamiento a proyectos que empleen esta tecnología (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, 2009).

Por lo que se refiere a la generación de electricidad en conexión con la red eléctrica, existen nichos de mercado financieramente viables para consumidores residenciales de electricidad de una capacidad de al menos 700 MW (potencial evaluado considerando un costo de inversión de 7.490 US\$/kWp instalado) (Secretaría de Energía-Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, 2009). Gracias a nuevas regulaciones que hacen posible la generación fotovoltaica conectada a la red, ya existen en el país algunos proyectos de este tipo, y hay interés de diversos actores por el desarrollo de otros, en particular en Baja California. Sin embargo, la viabilidad económica depende fuertemente de los costos de inversión y, nuevamente, la tarifa contra la cual el sistema compite (Secretaría de Energía-Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, 2009). En la tabla 4.2 se presentan los costos de inversión y generación para esta tecnología.

En resumen, los costos de la electricidad generada a partir del sol son todavía demasiado altos para poder ser competitivos con otras tecnologías, mientras que los costos de inversión también son superiores, como puede apreciarse en la tabla 3.2:

<b>Costos de tecnologías solares</b>		
	<b>Inversión</b>	<b>Generación</b>
Fotovoltaica	en red: 8.000 US\$/kW	En red: 0,26 - 0,36 US¢/kWh <sup>/b/</sup>
	fuera de red: 16.000 US\$/kW	Fuera de red: 40 - 60 US¢/kWh
Concentradores	2.200 US\$/kW	12 - 18 US¢/kWh
Colectores planos	242 US\$/m <sup>2</sup> instalado	-

<sup>/b/</sup> Suponiendo un costo de inversión de US\$7.490,90/kW

**Tabla 4.2 Costos de tecnologías solares**

Fuente: (Secretaría de Energía-Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, 2009)

Por lo que, finalmente, pese al gran potencial que presenta la región de estudio en materia de energía solar, 6 kilowatts-hora por metro cuadrado diario, de los más altos del mundo, esta tecnología no resulta ser la más adecuada para los fines aquí perseguidos, por implicar costos demasiado elevados así como por sus restrictivas características y requerimientos técnicos.

#### **4.1.3.3 Energía eólica**

Existen turbinas con capacidades desde 500 W hasta más de 7 MW. Las de mayor tamaño están destinadas principalmente a granjas eólicas marinas. En las últimas dos décadas su tecnología ha avanzado radicalmente y los costos han disminuido hasta hacerse competitivos con las tecnologías

convencionales en contextos geográficos favorables (Secretaría de Energía-Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, 2009). Existe potencial técnico y económico para el desarrollo de sistemas eólicos en aplicaciones fuera de la red eléctrica, tales como la generación de electricidad y el bombeo de agua por medio de aero-bombas.

El costo de las turbinas eólicas y el de generación se muestran en la tabla 4.3. La electricidad generada depende de la velocidad del viento y de su distribución a lo largo del año. En condiciones óptimas esta tecnología resulta competitiva con muchas de las tecnologías convencionales de generación de electricidad. Para el caso de las granjas eólicas marinas, el costo de la electricidad sube ligeramente. Empero, la factibilidad económica de estos proyectos dependerá de los mecanismos regulatorios y del acceso a los instrumentos internacionales relacionados con la mitigación del cambio climático.

<b>Costo de instalación de turbinas eólicas</b>	
<b>Inversión</b>	<b>Generación</b>
1,700 US\$/kW	Continental: 5 US¢/kWh Granjas marinas: 8-12 US¢/kWh

**Tabla 4.3 Costos de instalación de turbinas eólicas**  
Fuente: SENER-GTZ, 2009

Considerando esta información y la presentada en el capítulo II respecto al potencial eólico de Baja California y la región circunvecina a la zona de estudio, que es de los más altos de México y a nivel mundial, y que permitirían obtener factores de planta superiores al 20%; así como también por el potencial eólico del valle de San Quintín, resulta esta fuente energética bastante atractiva por todos los beneficios que ofrece, como lo son, costos moderados de inversión, alta eficiencia, factor de planta y flexibilidad técnica, pero, también, buena disponibilidad en la zona de interés.

#### **4.1.4 Evaluación de las alternativas de obtención de energía**

Para llevar a cabo esta tarea, se decidió analizar y evaluar por separado las energías convencionales de las renovables, para no perder objetividad en este estudio por cuestiones someras, como debido a los costos asociados de unos y otros tipos de energéticos, que pudieran ser demasiado dispares entre sí y mostrar un panorama engañoso al momento de realizar la elección de la fuente más adecuada a aprovechar.



#### 4.1.4.1 Análisis cualitativo

Primero se presentará el análisis de las energías convencionales, o combustibles fósiles y energía eléctrica de la red y posteriormente se mostrará el análisis de las energías renovables.

##### 4.1.4.1.1 Combustibles fósiles

En materia de combustibles fósiles, el análisis fue orientado, primeramente, a su disponibilidad en la zona de estudio, teniendo como base la información presentada en este trabajo obtenida de diversas fuentes de información y solicitudes de acceso a la información pública de distintas subsidiarias de Pemex, mostrando los resultados de su análisis cualitativo en la tabla 4.4.

<b>ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA DISPONIBILIDAD Y PRECIOS DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES</b>				
<b>Combustible</b>	<b>Disponibilidad en San Quintín a nivel Industrial</b>		<b>US\$/GJ</b>	
	<b>Presente</b>	<b>Proyectada</b>	<b>Presente</b>	<b>Proyectado</b>
<b>Gas natural</b>	Mala	Regular	8,64	Aumento
<b>Gas LP</b>	Mala	Regular	15,66	Aumento
<b>Diesel</b>	Mala	Regular	23,64	Aumento
<b>Combustóleo</b>	Ninguna-Mínima	Mala	12,78	Aumento
<b>Carbón</b>	Ninguna-Mínima	Mala	2,41	Aumento

Tabla 4.4 Análisis cualitativo de los combustibles fósiles en Baja California

Fuente: (Secretaría de Energía, 2010), (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010), (The McCloskey Group, 2010)

Posteriormente se aplicó este análisis a la evaluación de la infraestructura actual existente en el estado, necesaria para realizar la tarea de abastecimiento de cualquiera de ellos, deduciendo la información presentada en la tabla 4.5 de las mismas fuentes de información citadas.

ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA INFRAESTRUCTURA PARA ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLES FÓSILES							
Medio de Transporte	\$/ton/km Medio Transporte		Infraestructura existente San Quintín				Infraestructura proyectada
	Presente	Proyectado	Puerto	Ducto	Carretera	Ferrocarril	
Puerto-Buque	Bajo	Aumento	No	No	Sí	No	Ninguna
Carretera-Pipa	Elevado	Aumento	No	No	Sí	No	A largo plazo
Ferrocarril-Carro-tanque	No aplica	No aplica	No	No	Sí	No	Ninguna
Ducto	Bajo	Aumento moderado	No	No	Sí	No	Ninguna

Tabla 4.5 Análisis cualitativo de la infraestructura para abastecimiento de combustibles fósiles en Baja California

#### 4.1.4.1.2 Energía Eléctrica

La electricidad resulta ser una fuente energética cara, por ser una energía derivada de otras, sin embargo, en México es fuertemente subsidiada por el gobierno federal, sobre todo para los usos agrícola y residencial, lo que motiva su empleo desmedido y el desperdicio de agua (Muñoz & Fernández-Alba, 2008). En el año 2010, se le otorgaron descuentos de 76% y 88%, respecto a la tarifa normal, para su empleo en la operación de los equipos de bombeo y re-bombeo de agua para riego agrícola, por los sujetos productivos inscritos en el padrón de beneficiarios de energéticos agropecuarios, a través de las tarifas 9CU y 9N, respectivamente, con lo que el usuario de tales tarifas habría pagado de 22 hasta 44 centavos de peso por cada kilowatt hora (de 0,0174 hasta 0,0348 US\$/kWh) en baja o media tensión (Presidencia de la República, 2010), hasta por la cuota energética determinada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, de modo que cualquier uso distinto que se le diera a esta energía sería facturado al costo real bajo la tarifa 9 o 9M "Servicio para bombeo de agua para riego agrícola en baja o media tensión), al igual que la energía que exceda la cuota energética anual antes citada (Comisión Federal de Electricidad , 2007).

Así pues, la energía eléctrica necesaria para la operación de la planta desaladora no puede ser facturada por ninguna de las anteriores tarifas, sino que entraría en algún esquema tarifario para servicio general, bajo los cuales se estima que los costos operativos de la planta desaladora se elevarían demasiado.

En adición a esto, en la tabla 4.6 se presenta un análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA) de este energético, para tener un panorama más amplio del mismo.

<b>FORTALEZAS</b>	<b>OPORTUNIDADES</b>	<b>DEBILIDADES</b>	<b>AMENAZAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Generada con energías convencionales o alternativas (renovables)</li> <li>✚ Posibilidad de autoabastecimiento</li> <li>✚ Energía limpia, en caso de generación con renovables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Más mejoras en materia legal, que promuevan la generación eléctrica a partir de energías renovables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Si se deriva de las convencionales, es la energía más cara de todas</li> <li>✚ Hasta 15% de su generación perdida durante la transmisión</li> <li>✚ Esquema tarifario aplicable a la desaladora</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Posible insuficiencia de la infraestructura eléctrica local.</li> </ul>

Tabla 4.6 Análisis FODA del potencial de uso de la energía eléctrica

#### 4.1.4.1.3 Energías Renovables

El análisis cualitativo de estas energías también se realizó mediante un análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas, mostrado en las tablas 4.7 a 4.9, en base a la información sobre ellas disponible.

##### 4.1.4.1.3.1 Geotérmica

<b>FORTALEZAS</b>	<b>OPORTUNIDADES</b>	<b>DEBILIDADES</b>	<b>AMENAZAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ No dependiente de condiciones climatológicas</li> <li>✚ Generación eléctrica constante e ininterrumpida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Desarrollo de tecnología para empleo de recursos hidrotermales de baja entalpia en generación eléctrica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Altos costos de inversión en exploración, perforación de pozos y construcción de la planta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Disminución de costos de inversión de otras energías renovables o alternas</li> </ul>

Tabla 4.7 Análisis FODA de la energía geotérmica

#### 4.1.4.1.3.2 Solar

FORTALEZAS	OPORTUNIDADES	DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Irradiación solar global promedio en Baja California 6 kWh/m<sup>2</sup>/día</li> <li>✚ Uso en conexión con la red y en sitios aislados, con o sin radiación, por medio de baterías o almacenamiento de calor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Mejorar eficiencias para igualar a otras fuentes renovables</li> <li>✚ Disminución de costos de inversión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Requiere grandes extensiones de terreno para el equipo</li> <li>✚ Uso costero demanda mantenimiento más frecuente por acumulación de sal en espejos.</li> <li>✚ Potencial económico-financiero limitado a nichos específicos por altos costos de tecnologías</li> <li>✚ Viabilidad económica depende fuertemente de costos de inversión y tarifa contra la cual se compita</li> <li>✚ Escaso financiamiento</li> <li>✚ Requiere inversiones adicionales para almacenamiento de calor o electricidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Suministro de la red altamente subsidiado</li> <li>✚ Estructura tarifaria de la red</li> <li>✚ Evolución y abaratamiento de otras energías renovables más rápido</li> </ul>

Tabla 4.8 Análisis FODA de la energía solar

#### 4.1.4.1.3.3 Eólica

<b>FORTALEZAS</b>	<b>OPORTUNIDADES</b>	<b>DEBILIDADES</b>	<b>AMENAZAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Los costos de inversión más bajos de las energías renovables presentes en Baja California</li> <li>✚ Costos competitivos con las tecnologías convencionales en contextos geográficos favorables</li> <li>✚ Turbinas desde 500 W a más de 7 MW</li> <li>✚ Gran potencial de generación eléctrica en el estado y en el valle de San Quintín</li> <li>✚ Experiencia favorable en generación eólica en la costa del Pacífico de la Península de Baja California</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Mayor disminución de costos de inversión</li> <li>✚ Evolución de los aerogeneradores que les de mayor flexibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Costo de electricidad generada depende de velocidad del viento y su distribución a lo largo del año.</li> <li>✚ Factibilidad económica depende de mecanismos regulatorios y acceso a instrumentos internacionales relacionados con la mitigación del cambio climático</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abaratamiento de otras energías renovables o alternas</li> </ul>

Tabla 4.9 Análisis FODA de la energía eólica

#### 4.1.4.2 Análisis cuantitativo

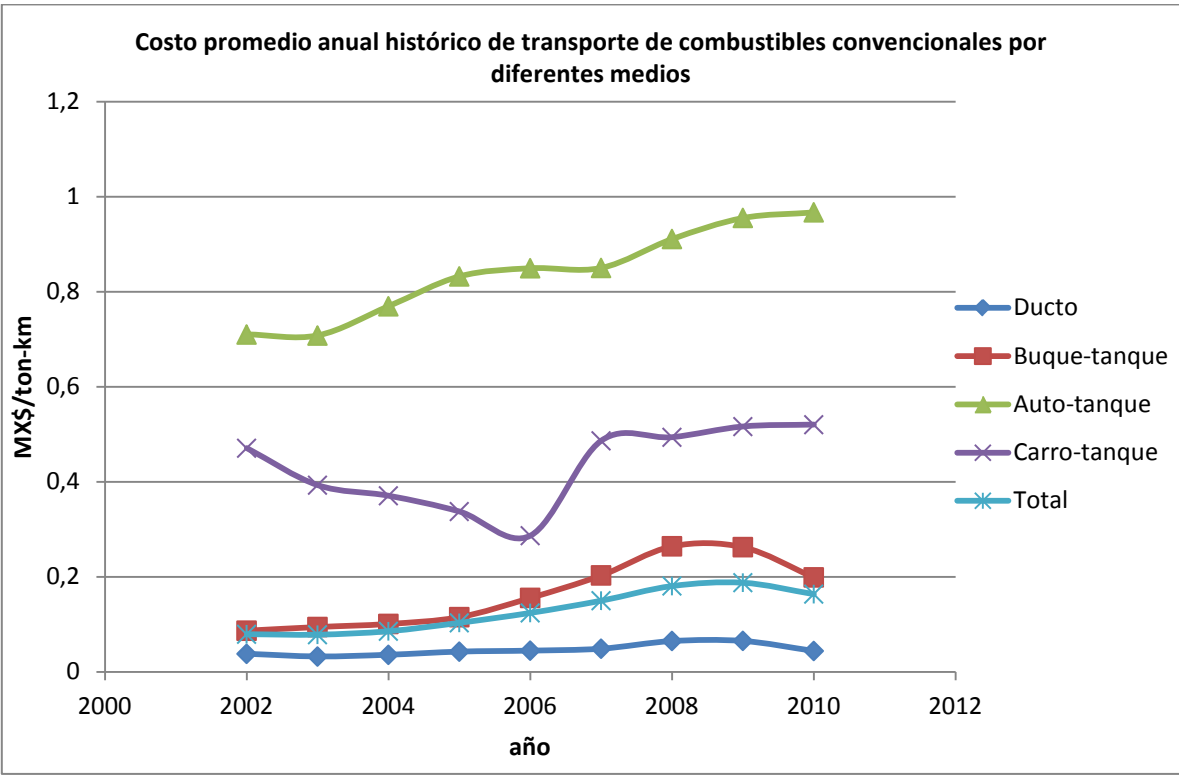
##### 4.1.4.2.1 Energías convencionales

Este análisis se enfocó a los costos de abastecimiento de los distintos energéticos, es decir, los gastos por concepto de transporte y distribución.

En la gráfica 4.1, puede observarse que, históricamente, los gastos que conllevan los distintos medios empleados en el abastecimiento y distribución de energéticos tienden a incrementarse

respecto al tiempo, además de que la diferencia en costo entre éstos también tiene una relación que se ha mantenido, resultando ser el auto-tanque el medio de transporte más costoso, seguido por el carro-tanque, posteriormente se tiene al buque-tanque; a lo que resulta el ducto ser el medio más económico, existiendo un amplio margen de costos entre éste y el auto-tanque. Además, los volúmenes que pueden transportarse con tales medios van incrementándose en el mismo orden en el que fueron enunciados. No obstante lo anterior, resulta ser relativa e inversamente proporcional el costo de inversión que cada uno de ellos implicaría, en caso de quererse emplear.

En cuanto a la electricidad se consideró que no se generarían gastos por concepto de su transmisión dado que se cuenta con la infraestructura necesaria para esa tarea, únicamente se comenta que los costos indirectos debido a las pérdidas por transmisión y eficiencia térmica de las centrales generadoras se consideran despreciables por fines prácticos dados los objetivos y el alcance de este trabajo.



Gráfica 4.1 Costo promedio anual histórico de transporte de combustibles convencionales por diferentes medios  
Fuente: PEMEX Refinación. Subdirección de Distribución, 2010

#### 4.1.4.2.2 Energías Renovables

El análisis cuantitativo de estas energías gira en torno a sus costos de inversión y generación, presentados a continuación en la tabla 4.10, para las diferentes modalidades que cada una tiene. Los datos en ella contenidos son información publicada por el gobierno federal (Secretaría de Energía-Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, 2009).

COSTOS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES				
	Geotermia	Solar		Eólica
		Fotovoltaica	Concentradores	
Inversión US\$/kW	3.800	8.000 <sup>/e/</sup>	2.200	1.700
		16.000 <sup>/f/</sup>		
Generación US\$/kWh	0,04-0,07 <sup>/c/</sup>	0,0026-0,0036 <sup>/e/</sup>		0,05 <sup>/g/</sup>
	0,005-0,02 <sup>/d/</sup>	0,4-0,6 <sup>/f/</sup>	0,12-0,18	0,08-0,12 <sup>/h/</sup>

<sup>/c/</sup> Generación eléctrica; <sup>/d/</sup> Aplicaciones térmicas; <sup>/e/</sup> En red; <sup>/f/</sup> Fuera de red; <sup>/g/</sup> Continental; <sup>/h/</sup> Marina

Tabla 4.10 Costos de inversión y generación de energía de las energías renovables citadas  
Fuente: SENER-GTZ, 2009

Puede observarse en la tabla anterior, que la fuente de energía renovable cuyos costos de inversión son los menores, es la energía eólica, y también es esta la que tiene uno de los menores costos de generación.

#### 4.1.5 Resultados

Del análisis cualitativo se tiene que en la actualidad en la zona en cuestión no hay buena disponibilidad de volúmenes industriales de combustibles fósiles, mientras que la proyección para el mediano plazo tampoco es muy prometedora; no obstante, puede esperarse que los costos de éstos sufran un alza de consideración en dicho plazo.

En seguida se tiene, del mismo análisis, que los costos de transporte por tonelada por kilómetro son bajos en el caso del ducto y del buque, mientras que el auto-tanque es el más caro, sobre todo en recorridos largos, por lo que su empleo implicaría costos adicionales al compararse con otros medios más eficientes, seguros y económicos como lo son el ducto o incluso el buque-tanque (PEMEX, 2009). Para todos ellos se proyecta, además, un aumento en tales precios en el mediano plazo. El transporte por ferrocarril no resulta ser una opción debido a la inexistencia de líneas férreas en el estado, de las que no se espera construcción futura, como tampoco de algún puerto

o ducto, de los cuales se carece actualmente en el valle de San Quintín, y solamente podría esperarse la ampliación de la infraestructura carretera en el mediano o largo plazo.

Referente a la energía eléctrica del sistema eléctrico estatal, ésta recibe subsidios de hasta el 88% de su costo real para el bombeo de agua para riego. No obstante, para alimentar la desaladora no aplica tal descuento y, por el contrario, no resultaría nada adecuada debido a que el esquema tarifario aplicable, que podría significar los costos energéticos más altos de todas las energías convencionales, por ser la energía de la red una energía derivada, generada por combustión, de la cual también hay que mencionar que se pierde alrededor del 15% durante la transmisión por los propios fenómenos físicos, con lo que para compensar estas pérdidas es necesaria la producción de una proporción adicional de energía en las plantas térmicas generadoras, lo que implica un aumento en la quema de combustibles fósiles para lograr dicho cometido, con lo que se están incrementando también las emisiones contaminantes.

Los costos en los que se incurriría para el abastecimiento de combustibles fósiles al valle de San Quintín estarían compuestos de los relacionados con la adquisición de la molécula de los clientes-distribuidores de Pemex más un cargo adicional por concepto de distribución (Pemex Refinación. Subdirección de distribución. Gerencia de operaciones, 2010). Ante esto, no podría esperarse que el emplear estas energías resultase ser una alternativa viable, debido a que la única manera de adquirirlos sería con el transporte por auto-tanque, cuyos costos operativos son los más elevados y su capacidad la más pequeña, por lo que los gastos totales habrían de ser demasiado elevados; mientras que la construcción de cualquier otro tipo de infraestructura queda fuera de los objetivos de este trabajo, al representar por sí misma otro proyecto.

Por su parte, de ambos análisis se resume que la energía eléctrica podría derivar en los costos energéticos de la planta desaladora más elevados de todos, sobre todo si estuviera sujeta al servicio proporcionado por el Estado. Pero gracias a las recientes reformas en materia energética, que permiten el autoabastecimiento y la generación mediante energías renovables, el panorama apenas descrito cambia radicalmente, ya que podrían obtenerse costos bajos de electricidad mediante la autogeneración, realizada a partir de la energía eólica que, de entre las demás fuentes renovables aquí estudiadas, es la de menores costos de inversión y prácticamente, de generación, lo que, aunado al potencial de la zona de estudio, resulta en ser la fuente energética renovable técnicamente más viable y conveniente, de acuerdo a lo expuesto en ambos análisis practicados, pues la zona de estudio no cuenta con energía geotérmica, que implica fuertes cantidades de dinero por concepto de inversión; en tanto que la energía solar aun presenta muchas restricciones técnicas como baja eficiencia de conversión, la necesidad de grandes extensiones de tierra y mantenimiento más frecuente en zonas costeras, además de elevados costos de inversión y escaso financiamiento para proyectos que la involucren.



#### 4.1.6 Conclusiones

No parece nada recomendable el empleo de combustible fósil alguno, debido, en primer lugar, a que los combustibles fósiles no figuran ser la mejor opción de fuente de alimentación de una planta desaladora en el valle de San Quintín, por no contar tal sitio con fuentes naturales de ellos ni con infraestructura que permita su abastecimiento en volúmenes industriales a bajo costo, importe que se sumaría a su elevado precio de adquisición, sin olvidar los efectos nocivos al medio ambiente por la emisión de gases de efecto invernadero producto de su combustión. En segundo lugar, a que éstos presentan actualmente grandes subsidios en sus precios de venta finales, y puede esperarse que tales apoyos vayan siendo retirados con el transcurso del tiempo, lo cual, junto con la tendencia mundial de los precios de éstos a incrementarse, haría más costoso su empleo.

En contraste, el potencial de energías renovables que posee el estado es muy prometedor, no sólo para satisfacer las necesidades presentes de energía sino también las de las futuras generaciones, con costos de inversión y de operación y mantenimiento de sus respectivas tecnologías de explotación cada vez más competitivos frente a las de los combustibles fósiles, y que, por el contrario a los de estos últimos, mantendrán esa tendencia a la baja que han mostrado ya desde varios años, en función de la mejora en su eficiencia.

La energía eléctrica obtenida de la red, al provenir principalmente de la combustión, resulta ser una fuente energética cara por derivarse de otras, esto a pesar de que en México es fuertemente subsidiada por el gobierno federal para apoyar al sector agrícola, lo que motiva su descuido. Pero, también en este caso, podría esperarse la disminución paulatina futura de tal beneficio, lo que promovería su uso razonable y eficiente por parte de todos sus usuarios, y esto podría ser una ventaja para la generación eléctrica a partir de fuentes renovables como la solar que, pese a poder tener los costos de generación más bajos, resulta ser la más costosa de todas en cuanto a inversión, lo que no le permite competir actualmente contra los esquemas tarifarios de la red, dada también su aun poca eficiencia en comparación con las demás tecnologías y poca flexibilidad técnica, sobre todo, por requerir de grandes extensiones de tierra para la instalación de los paneles. Por su parte, la energía geotérmica no resulta nada apropiada para esta propuesta, debido, en primer lugar, a que en el valle de San Quintín no existen manifestaciones termales con el potencial suficiente para tener un aporte de consideración al proyecto, mientras que sus costos de inversión son de los más elevados.

Es así que la opción más viable para obtener energía para la planta desaladora propuesta sería la autogeneración eléctrica a partir de energía eólica, pues su tecnología de explotación es madura y se ha desarrollado mucho en los últimos años de entre las demás fuentes renovables, logrando gran eficiencia y disminución de costos, a tal punto que resulta bastante competitiva frente a las energías convencionales bajo contextos geográficos favorables, siendo este el caso que se tiene en la zona de estudio, valle de San Quintín, como se mostró en su momento en el capítulo II.

# V. ALTERNATIVAS DE DESALACIÓN: EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

## 5.1 Aspectos fundamentales

### 5.1.1 Conceptos básicos

#### 5.1.1.1 Sólidos Disueltos Totales (TDS)

Es una propiedad muy útil de una solución acuosa determinada por el peso de los residuos que quedan al evaporar un volumen conocido de agua, por lo que, de manera general, es igual al peso obtenido de la suma de las masas de las especies individuales en solución, y se incrementa al aumentar la cantidad de sales y otros sólidos disueltos en el agua. Se mide en miligramos de soluto por litro de solvente (mg/L) o en partes por millón (ppm), siendo 1 mg/L igual a 1 ppm.

El agua potable no debe exceder 500 mg/L de TDS. No obstante, puede considerarse aceptable hasta 1.000 mg/L de TDS (Bureau of Reclamation. United States Department o the Interior, 2003).

#### 5.1.1.2 Clasificación del agua salada

El agua se clasifica en dulce, salobre, salina y salmuera, dependiendo de la cantidad de TDS o ppm que contenga (Bureau of Reclamation. United States Department o the Interior, 2003).

- *Agua Dulce (Potable)*: Suficientemente diluida para ser potable (TDS < 1.000 mg/L)

- *Agua salobre*. Muy salada para ser potable, pero significativamente menos salada que el agua de mar (TDS = 1.000 - 20.000 mg/L). La composición química de las aguas salobres varía ampliamente y es muy dependiente del sitio. Pueden sub-clasificarse en:
  - *Ligera*: TDS = 1.000 - 5.000 mg/L
  - *Moderada*: TDS = 5.000 - 15.000 mg/L
  - *Pesada*: TDS = 15.000 ≤ 35.000 mg/L
- *Agua salina*. Similar o más salada que el agua de mar (TDS ~35.000 mg/L)
- *Salmuera*. Significativamente más salada que el agua de mar.

Del agua de alimentación dependerá casi totalmente el diseño del sistema de desalación y, una vez en operación, las variaciones en sus características afectarán positiva o negativamente la calidad del permeado, la energía demandada por la planta y el tiempo de vida de los componentes del sistema.

### 5.1.2 Efectos ambientales

La instalación y la operación de un complejo de desalación de agua, como cualquier otra actividad del ser humano, puede tener impactos potenciales adversos al entorno, en específico, en la calidad del aire, en el ambiente acuático/marino, en el agua subterránea y posiblemente en otros aspectos. Todo esto debe ser considerado y sus requerimientos de aceptabilidad y mitigación deberán ser materia de regulación y de políticas nacionales y locales. Sin embargo, esto no debe ser razón que desmotive el empleo de la desalación de agua, ya que es posible reducir el impacto de tales afectaciones al mínimo llevando a cabo estudios de impacto ambiental para examinar dichos efectos en cada sitio que sea candidato para la planta y, de igual manera, posterior a la instalación de la misma se habrán de instituir programas de monitoreo. Algunas de las afectaciones que genera una planta desaladora son las siguientes (World Health Organization, 2007):

Su construcción impactará la ecología de la zona de costa, del suelo marino o del entorno natural del sitio, el hábitat de aves y mamíferos; puede ocasionar erosión y contaminación generalizada por fuentes difusas.

La energía que emplee repercutirá por todo lo relacionado con fuentes y transportación de combustibles, descargas de agua de enfriamiento, emisiones al aire por generación eléctrica y quema de combustibles.

El ambiente marino se podría verse alterado por la composición y temperatura de las descargas de desecho en la zona de mezcla, por los efectos de los bactericidas, niveles de oxígeno y metales tóxicos, turbidez y salinidad de tales corrientes; así como también en la zona de toma de agua de alimentación. Todo esto en conjunto puede impactar la pesca comercial, recreación y muchos otros.

Las aguas subterráneas pueden recibir filtración desde lagunas de evaporación, si las hubiere, causando incremento de salinidad y posibilidad de sedimentación de metales tóxicos.

Todo esto debe ser razón de consideración al momento de llevar a cabo la conceptualización de un proyecto de esta índole, buscando emplear o adecuar la tecnología de tal manera que las afectaciones ambientales se reduzcan al mínimo, y es parte de lo que ha dado mayor motivación al desarrollo de proyectos de desalación de agua acoplados a una fuente de energía renovable.

## **5.2 Selección tecnológica**

### **5.2.1 Tipos de tecnologías**

Al demandar, todos los procesos de desalación, energía de manera intensa, los esfuerzos de investigación y desarrollo han sido encaminados continuamente hacia la búsqueda de métodos o soluciones que mejoren la eficiencia y reduzcan el consumo energético, siendo la cogeneración de electricidad y agua una solución que es ahora una norma en proyectos de desalación, y ésta se puede aplicar a las dos familias básicas de tecnologías de desalación empleadas comercialmente en todo el mundo, que son las que se abordaron en este capítulo debido a que ello es prueba de su factibilidad y viabilidad; éstas son la de destilación y la de membranas.

Cuando se desea seleccionar entre los procesos de membranas y térmicos, en específico, ósmosis inversa y destilación, y ambos pudieran parecer adecuados para un sitio específico, la disponibilidad de energía renovable y los requerimientos de energía, ya sea eléctrica, mecánica o térmica, del proceso limitan la posible selección; mientras que lo que la determina es la capacidad requerida de la planta, la distribución de la demanda anual y diaria de agua desalada, el costo del producto, la madurez de la tecnología y cualquier problema relacionado al acoplamiento de la energía renovable con los sistemas de desalación (García-Rodríguez, 2003).

Este capítulo se desarrolló con base en dicho fundamento dados los resultados y las conclusiones de la investigación sobre fuentes de energía para el proyecto, presentados en el capítulo pasado. Por lo cual, enseguida se describirán ambas familias de tecnologías de desalación, tratando muy brevemente, a modo introductorio, los procesos de destilación, para enfocarse más hacia las tecnologías de membranas, que son las que mejor se acoplan a la energía eólica, fuente seleccionada en el capítulo anterior. No obstante, se consideró importante la participación de las tecnologías térmicas en la evaluación tecnológica.

### **5.2.1.1 Descripción general de las tecnologías de desalación: Características y parámetros de operación**

La información presentada a continuación sintetiza únicamente los puntos de interés sobre cada tecnología para la posterior selección de la más adecuada a los fines aquí planteados.

#### **5.2.1.1.1 Tecnologías de destilación**

El fundamento mediante el cual operan estos procesos es el calentamiento de una solución salina hasta su ebullición, ya que los sólidos y las sales disueltos, que relativamente no son volátiles, permanecen en la solución condensada aumentando su concentración, lo que le da el nombre de salmuera y que normalmente es desechada. Mientras tanto, el vapor que escapa consiste principalmente de gases solubles de agua pura que al condensarse forman un producto libre de TDS, en un rango de 1 a 50 mg/L, boro, sodio y bromuros.

Los procesos de destilación transfieren el calor generado durante la condensación del vapor para evaporar el agua de alimentación, con lo que se mejora la eficiencia térmica del proceso y se reduce el consumo de combustible y el costo. Los problemas ingenieriles fundamentales tienen que ver con encontrar formas de transferir grandes cantidades de agua, vapor y calor de manera económica (Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior, 2003).

La desalación mediante procesos térmicos es la tecnología predominante para desalar agua bajo condiciones en las que la generación de energía y la producción de agua son combinadas, y cuando no se cuenta con una fuente alterna de agua y se tiene disponibilidad de recursos energéticos convencionales.

Los principales sistemas de destilación que logran lo anterior son:

- Destilación Flash de Múltiples Etapas (MSF)
- Destilación de Múltiples Efectos (MED)
- Destilación de Múltiples Efectos con Compresión de Vapor (MED-TVC)

Pero son los dos primeros procesos los más ampliamente empleados y, en su mayoría, desalan agua de mar.

Generalmente, la destilación a altas temperaturas resulta más económica. Al elevar la temperatura del proceso se incrementa la diferencia de la misma entre la temperatura de operación y la del agua de alimentación. Dicha diferencia es la fuerza impulsora de la evaporación, pues mientras mayor sea ésta, mayor será la cantidad de agua que puede ser producida para un tamaño dado de evaporador. Esta diferencia de temperaturas permite aumentar el número de etapas o efectos en los procesos MED o MSF, si bien lo anterior implicaría un aumento del costo de capital del proceso, también reduce los requerimientos energéticos, lo que le da un incremento de desempeño, por lo que se puede producir más destilado por cada unidad de energía (Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior, 2003).

Un problema muy común en los procesos de destilación es el fenómeno de la formación de incrustaciones, que son agentes indeseables por tener mucha menor conductividad térmica que el metal, que se forman cuando se depositan materiales sólidos sobre superficies por las que ocurre transferencia de calor. Su formación puede prevenirse limitando la temperatura de operación del proceso y pre-tratando el agua de alimentación, con lo cual se puede disminuir la frecuencia de limpieza del sistema (Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior, 2003).

#### **5.2.1.1.2 Tecnologías de membranas**

Estas tecnologías emplean membranas delgadas semipermeables para separar a los minerales del agua, dividiendo la corriente de alimentación en dos corrientes con diferente concentración de sales, una corriente de permeado y otra de concentrado. La alimentación puede ser agua salobre o salada o incluso efluentes de aguas residuales altamente tratadas. Las tecnologías de membranas incluyen, principalmente, a los procesos siguientes:

- Ósmosis Inversa (RO, por sus siglas en inglés)
- Electrodiálisis (ED) y electrodiálisis inversa (EDR, también en inglés).

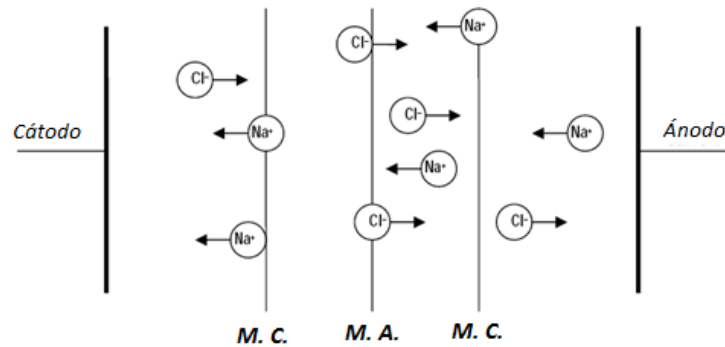
La ósmosis inversa emplea presión como fuerza impulsora para separar la corriente de alimentación en una de permeado y otra de concentrado. Los procesos de electrodiálisis y electrodiálisis inversa hacen pasar una corriente directa (DC) a través del agua, para separar los iones positivos y negativos de las sales disueltas de la corriente de alimentación, conduciéndolos a través de membranas hacia electrodos de carga opuesta.

La concentración de TDS y la calidad del agua de alimentación determinan en gran medida cuál de estas dos tecnologías de separación sería más apropiada y costo-efectiva para una aplicación específica.

##### **5.2.1.1.2.1 Electrodiálisis (ED)**

Los sistemas basados en electrodiálisis emplean membranas de transferencia de iones para separar a éstos del agua de alimentación. Estas membranas, esencialmente, son láminas selectivas de resina fundida de 0,5 milímetros de espesor, que contienen grupos de intercambio de aniones y cationes y van a permitir la transferencia unidireccional de iones de determinada carga a través de ellas, bajo el efecto de un campo de corriente directa. El agua fluye de un lado a otro de las superficies de la membrana, no a través, con lo que los aniones y los cationes son transferidos eléctricamente a través de las membranas al electrodo respectivo, del flujo de agua de alimentación, al flujo de concentrado, de modo que se forma una corriente rica en iones y otra pobre en iones, en espacios alternados entre las membranas, por la influencia de la corriente directa. Este proceso se muestra, en su manera más simple, en la figura 5.1, a modo de ejemplo. El

agua desalada es producida en los compartimientos a la izquierda de la membrana de aniones, M.A. en la figura 5.1, y el concentrado en los compartimientos a la derecha.



**Figura 5.1** Esquema general de un sistema de electrodiálisis  
Fuente: World Health Organization, 2007

La eficiencia en la remoción de TDS de los sistemas de electrodiálisis no se ve afectada por compuestos no ionizados o aquellos con una carga iónica débil (por ejemplo, partículas sólidas, óxido de silicio, compuestos orgánicos y microorganismos). Por ello, estos procesos de desalación pueden tratar aguas más turbias y con mayor potencial de formar incrustaciones y taponamiento que los de ósmosis inversa, pero su eficiencia en la remoción de TDS es generalmente menor (de 15% a 90%, contra el 99% a 99,8% de la ósmosis inversa), además de que no remueven patógenos ni óxido de silicio del agua de alimentación. Por estas razones los sistemas basados en electrodiálisis han tenido mayor uso práctico principalmente para la desalación de agua con baja salinidad (TDS<3.000 mg/L) y en la reutilización de aguas residuales para irrigación, en donde resulta más competitiva (World Health Organization, 2007).

#### 5.2.1.1.2.2 Ósmosis Inversa (RO)

La ósmosis es un proceso natural en el cual el agua pasa a través de una membrana semipermeable desde una solución con baja concentración de sales hacia otra solución con mayor concentración de sales. La fuerza impulsora para el paso del agua es conocida como presión osmótica, que depende de la diferencia de concentración de sales entre dos soluciones, como se muestra en la figura 5.2. La cabeza de presión es igual a la presión osmótica en el punto en el cual no existe presión neta de agua a través de la membrana, figura 5.3. Si a la solución de concentrado se le aplica una presión mayor que la presión osmótica de la solución, el agua fluirá a través de la membrana desde la solución concentrada, pero sin las sales disueltas.

Puede emplearse para desalar agua de cualquier tipo y con cualquier nivel de salinidad. Los sistemas de ósmosis inversa para agua de mar son suficientemente eficientes en la remoción de patógenos (bacterias, virus, entre otros), organismos con tamaño de 0,002 micrómetros o mayores (World Health Organization, 2007).

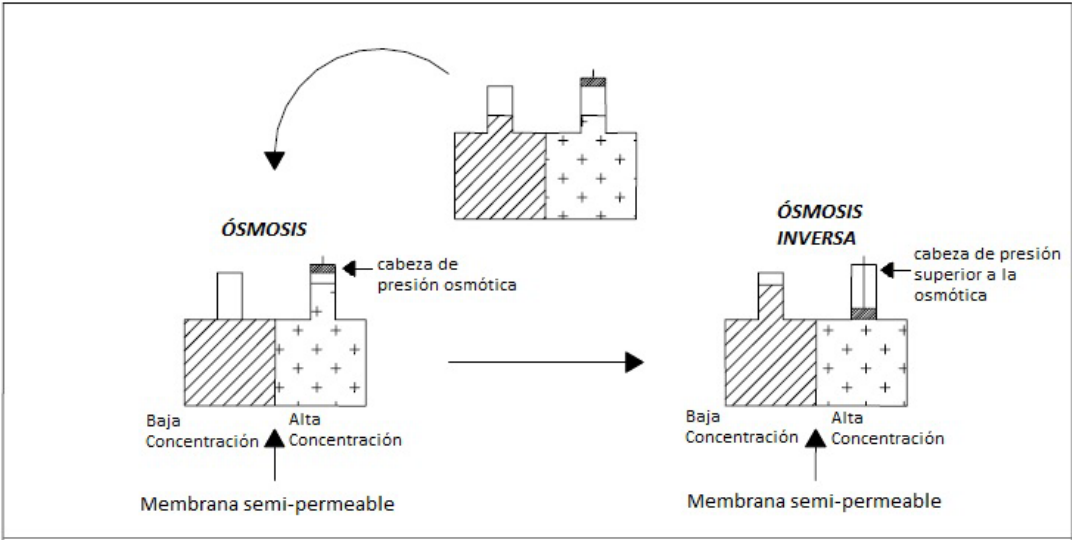


Figura 5.2 Ósmosis y ósmosis inversa  
Fuente: Desalting Handbook for Planners, 2003

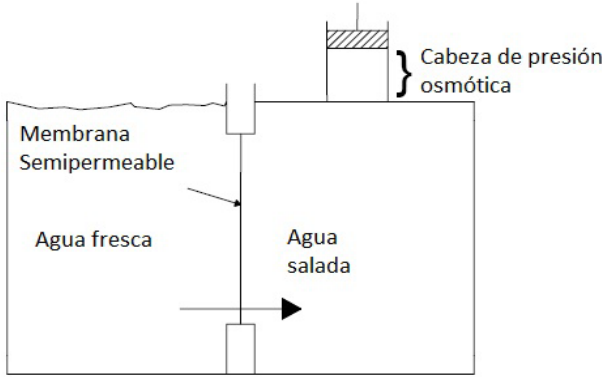


Figura 5.3 Presión osmótica  
Fuente: Desalting Handbook for Planners, 2003



La proporción del agua de alimentación que es recuperada como agua producto o permeado es la variable más importante del proceso, y es conocida como recuperación; el factor que la limita es, principalmente, de naturaleza química, ya que con el agua también llegan a pasar la sal y otros elementos debido a que las membranas semipermeables no son perfectas (Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior, 2003).

Generalmente, la ósmosis inversa representa costos de capital y de operación menores a los procesos de destilación (Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior, 2003).

## **5.2.2 Evaluación de las tecnologías**

Se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo de los aspectos técnicos de los procesos de desalación estudiados. En el caso del análisis cualitativo, se abordaron las ventajas y desventajas técnicas de cada uno, que se condensan en la tabla 5.1; mientras que el análisis cuantitativo buscó comparar su nivel de adecuación, de acuerdo a sus características técnicas presentadas en la tabla 5.2, a las necesidades particulares, los objetivos y el alcance del proyecto propuesto. Posteriormente se describen los resultados observados y, finalmente, se concluye al final del capítulo.

### **5.2.2.1 Análisis técnico-cualitativo**

Tabla 5.1 Comparación técnica de los procesos de desalación  
Fuente: DeutscheMeerwasserEntsalzung, GmbH, 2009

Proceso	Pros	Contras
<b>Destilación Flash de Múltiples Etapas (MSF)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Proceso robusto, totalmente desarrollado</li> <li>✚ Muy bajo consumo de químicos.</li> <li>✚ Fácil de acoplar con centrales eléctricas.</li> <li>✚ Tamaños de unidad grandes, hasta 76.000 m<sup>3</sup>/d.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Alto consumo energético.</li> <li>✚ Costos específicos de inversión relativamente elevados.</li> <li>✚ Acoplamiento mandatorio con centrales eléctricas.</li> <li>✚ Gran volumen de agua de alimentación necesario.</li> </ul>
<b>Destilación de Múltiples Efectos (MED)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Proceso robusto y desarrollado.</li> <li>✚ Muy bajo consumo de químicos.</li> <li>✚ Ideal para acoplarse con centrales eléctricas.</li> <li>✚ Muy bajo consumo de electricidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Consumo energético alto.</li> <li>✚ Costos específicos de inversión muy elevados.</li> <li>✚ Acoplamiento propuesto con centrales eléctricas.</li> <li>✚ Gran volumen de agua de alimentación necesario (invierno).</li> </ul>
<b>Destilación de Múltiples Efectos con Compresión de Vapor (MED-TVC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Proceso robusto y desarrollado.</li> <li>✚ Muy bajo consumo de químicos.</li> <li>✚ Muy bajo consumo eléctrico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Consumo energético de medio a elevado.</li> <li>✚ Costos específicos de inversión moderados.</li> <li>✚ Acoplamiento propuesto con centrales eléctricas.</li> <li>✚ Gran volumen de agua de alimentación necesario (invierno).</li> </ul>
<b>Ósmosis Inversa (RO)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Muy bajo consumo energético (el menor de los procesos comerciales)</li> <li>✚ Costos específicos de inversión bajos; muy poca superficie de terreno necesaria para agua de alimentación "ideal".</li> <li>✚ Volumen necesario de agua de alimentación pequeño.</li> <li>✚ Pre-tratamiento simple con agua salobre de pozo.</li> <li>✚ Operación altamente automatizada.</li> <li>✚ Labor manual principalmente en monitoreo y mantenimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ Costos operativos muy elevados por químicos y reemplazo de membranas</li> <li>✚ Costos específicos de inversión muy elevados cuando agua de alimentación "difícil".</li> <li>✚ El mal funcionamiento puede dañar la planta.</li> <li>✚ Personal de operación y mantenimiento más calificado que para procesos térmicos.</li> </ul>

### 5.2.2.2 Análisis técnico-cuantitativo

Tabla 5.2 Comparación de los aspectos técnicos de los procesos de desalación

Fuente: DeutscheMeerwasserEntsalzung, GmbH, 2009

	MSF	MED	MED-TVC	MVC	RO	ED
Temperatura máxima de operación típica	<120 En rango	<70 En rango	<70 En rango	<70 <sup>/1/</sup> En rango	<40 En rango	<40 En rango
Forma de energía	Vapor Inadecuado	Vapor Inadecuado	Vapor Inadecuado	Mecánica (eléctrica) Adecuado	Mecánica (eléctrica) Adecuado	eléctrica adecuado
Consumo de energía térmica (kJ/kg de destilado) <sup>/4/</sup>	250-400	250-400	250-400	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Consumo típico de electricidad (kWh/m <sup>3</sup> )	4.5	1.5	1.5	8-14	3-4 <sup>/2/</sup>	1.0 <sup>/3/</sup>
Contenido típico de sal del agua de alimentación (ppm TDS)	30.000-100.000 Sobrado	30.000-100.000 Sobrado	30.000-100.000 Sobrado	30.000-50.000 Sobrado	1.000-45.000 Adecuado	100-3.000 Fuera de rango
Calidad del agua producto (ppm TDS)	<10 Excelente	<10 Excelente	<10 Excelente	<10 Excelente	<500 Aceptable	<500 Aceptable
Capacidad actual típica de un tren individual (m <sup>3</sup> /d)	5.000-76.000 Sobrado	500-15.000 En rango	100-22.500 (30.000) Sobrado	10-3.000 En rango	1-10.000 En rango	1-12.000 En rango

MSF: Destilación Flash de Múltiples Etapas; MED: Destilación de Múltiples Efectos; MED-TVC: Destilación de Múltiples Efectos con Compresión de Vapor; RO: Ósmosis Inversa; ED: Electrodiálisis.

<sup>/1/</sup> En casos excepcionales con dosificación de ácido: 100 °C

<sup>/2/</sup> Agua de mar como alimentación. En sistemas de baja presión, menos de 1 kWh/m<sup>3</sup>. Fuente: (Wilf, 2010)

<sup>/3/</sup> Dependiendo del contenido de sal del agua de alimentación: a 1.500 ppm TDS (añadir 0,5 kWh por cada 1.000 ppm de iones removidos)

<sup>/4/</sup> Consumo de calor también se expresa como PR = tasa de desempeño, que significa kg de destilado producido por 2.326 kJ. PR = 8 implica consumo de calor en calentador de salmuera de 2.326 / 8 = 290.75kJ/kg de destilado.

### 5.2.3 Resultados

Del análisis de la información técnico-cualitativa de los aspectos técnicos de las tecnologías abordadas se resume que las tres tecnologías de destilación son muy costosas, en general, por concepto de inversión y consumo energético, motivo por el cual su empleo es principalmente apropiado cuando se emplean para cogeneración, debido a que para la producción de electricidad y agua puede emplearse el mismo calor generado, lo que contribuye a que la demanda general de energía del proceso sea menor; aunque los grandes volúmenes de agua de alimentación necesarios influyen en el tamaño de las unidades desaladoras, que habrán de ser de gran capacidad. En contraste con la considerable demanda de calor y de agua de alimentación que tienen estas tecnologías, tienen poca necesidad de químicos y de electricidad, que les representa una ventaja, así como también el ser todos ellos procesos robustos y ampliamente desarrollados que no requieren de personal tan cualificado. No obstante, a menos que fueran el único medio de obtención de agua desalada, resultan rentables sólo con tales capacidades, cuando se instalan en lugares donde abundan o son económicos los combustibles que éstas requieren o, como se ha dicho, en cogeneración, pues de lo contrario los costos específicos de inversión y el consumo de energía podrían elevar demasiado el precio del metro cúbico de agua desalada.

Por otro lado, del análisis de la información técnico-cuantitativa se puede decir que las tecnologías de destilación son más apropiadas para desalar aguas con un alto contenido de sales, como la de mar, no siendo este el caso de la zona de estudio, en donde serían tratadas aguas salobres, situación a la cual se adapta muy bien la ósmosis inversa así como también a volúmenes pequeños de desalación, ya que, además de tener el segundo más bajo consumo energético de entre todos los procesos empleados comercialmente, puede tener un bajo costo de inversión cuando la calidad del agua de alimentación sea la apropiada que, de lo contrario, ese costo así como los de operación y mantenimiento pueden llegar a ser muy elevados por concepto de pre-tratamiento del agua de alimentación y membranas de reemplazo, en adición a los costos por consumo energético y personal cualificado. Empero, como se indicó en su momento, las condiciones apropiadas necesarias para el proceso de ósmosis inversa son las que más se asemejan a las presentes en la zona de estudio.

Otro aspecto que debe ser comentado es que las temperaturas de operación de los procesos de destilación son muy elevadas, que explicaría su elevado consumo energético y probablemente implicaría un alto costo de operación por tal concepto, pero que también implica que el flujo de desecho de salmuera tendrá una alta temperatura en comparación con la ambiental, y con la de ósmosis inversa, impactando más severamente al entorno.

Respecto a la otra tecnología de membranas, la electrodiálisis, basta decir que aquella no resulta adecuada para esta propuesta debido al reducido rango de contenido de sal del agua de alimentación que es capaz de tratar, pues éste está fuera de los niveles probables del agua del acuífero San Quintín.

#### **5.2.4 Conclusiones sobre selección tecnológica**

Con lo anteriormente expuesto puede concluirse, sin la necesidad de entrar en mayores detalles, que la tecnología más adecuada para el proyecto aquí propuesto es, en definitiva, la ósmosis inversa, al no ser técnicamente aplicable la electrodiálisis, y los procesos térmicos implicar grandes capacidades, consumo energético y costos de inversión.

Por otro lado, el proceso de ósmosis inversa es perfectamente adecuado para la fuente de abastecimiento de agua de alimentación a la planta propuesta en el capítulo III, que es el agua salobre del acuífero San Quintín, por los beneficios técnicos y ambientales que conlleva, citados en tal capítulo y en la evaluación tecnológica realizada en el presente, en vez de emplear agua de mar; mientras que también resulta ideal este proceso con la fuente de energía propuesta en el capítulo IV.

En lo que resta del capítulo actual se presentarán los tópicos más importantes al respecto de la desalación de agua salobre por ósmosis inversa, para, en el capítulo VI, abordar la información necesaria que permita realizar el diseño del sistema de ósmosis inversa requerido.

#### **5.3 Requerimientos operativos específicos**

El desempeño y la eficiencia de los sistemas de ósmosis inversa son dependientes de la calidad del agua de alimentación (sólidos disueltos totales, temperatura, compuestos que formen incrustaciones, etc.) y del pre-tratamiento físico y químico (World Health Organization, 2007). Por lo tanto, también el consumo energético del proceso dependerá de tales factores.

En específico, la integridad del material de la membrana de este proceso es especialmente dependiente, además de otros factores, de la calidad del agua de alimentación (el pH, la temperatura, el contenido de materia orgánica, concentración de agentes oxidantes, de aceite y grasa en el agua y el contenido de sólidos), por lo cual y para garantizar una operación adecuada del sistema es necesario realizar un pre-tratamiento al agua de alimentación, con lo que se pueda garantizar el tiempo de vida de la membrana que, para la etapa de planeación del proyecto, se supone de 3 a 7 años, dependiendo del material de la membrana (Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior, 2003).

### **5.3.1 Calidad del agua de alimentación y producto**

#### **5.3.1.1 Química del agua: tipo de agua de alimentación y análisis**

La mayor parte de los tipos de agua tratados en sistemas de ósmosis inversa se pueden caracterizar, a grandes rasgos, por el contenido de Sólidos Disueltos Totales (TDS) y la carga orgánica (Carbono Orgánico Total, cuyas siglas en inglés son TOC), y éstos se describen brevemente a continuación (Dow Chemical Company, 2010):

- Muy baja salinidad, aguas de alta pureza (HPW) provenientes de un primer sistema de ósmosis inversa (sistema de ósmosis inversa de doble paso) o la etapa de terminado en sistemas de agua ultra-pura (UPW) hasta con 50 mg/L de TDS.
- Aguas de baja salinidad del grifo hasta con 500 mg/L de TDS.
- Aguas subterráneas de media salinidad con elevada materia orgánica natural (NOM) y hasta 5.000 mg/L de TDS.
- Aguas salobres de media salinidad hasta con 5.000 mg/L de TDS.
- Efluentes terciarios de media salinidad con niveles de TOC y demanda biológica de oxígeno (BOD) elevados y hasta 5.000 mg/L de TDS.
- Aguas salobres de elevada salinidad con rango de TDS de 5.000 a 15.000 mg/L.
- Agua de mar con TDS alrededor de los 35.000 mg/L.

La composición de las aguas salobres puede variar ampliamente, por lo que para un buen diseño del proceso es obligatorio un análisis del agua. En la tabla C.1 del apéndice C pueden consultarse algunos ejemplos de la composición de distintas aguas salobres, que ilustran lo anteriormente dicho.

#### **5.3.1.2 Pre-tratamiento del agua de alimentación**

El principal objetivo de este tratamiento es remover partículas de materia del agua de alimentación y añadir químicos (ácido o inhibidor de incrustaciones) para prevenir formación de incrustaciones en la membrana.

Como ya se mencionó, la recuperación de un sistema para aguas salobres es dependiente, fundamentalmente, de la química del agua, debido a que el rechazo de sal varía para diferentes iones y, por lo tanto, por su concentración (Wilf, 2010) (generalmente los iones multivalentes son mejor rechazados que los iones monovalentes), y puede ser afectada también por factores tales como la temperatura (World Health Organization, 2007). Así, ambos parámetros influirán, por ejemplo, en el potencial de precipitación y formación de incrustaciones de carbonato o sulfato de calcio, especialmente cuando los niveles de silicio o bicarbonato en el agua de alimentación son elevados. El potencial de taponamiento debido a materia orgánica es también otro factor limitante en la desalación de agua salobre (Dow Chemical Company, 2010).

Ante la amplia variación en la calidad del agua de alimentación, el primer paso es conocer las características del agua. Antes de poder hacer la proyección del diseño del sistema de ósmosis inversa, se debe contar con un análisis completo y exacto del agua, y debe estar balanceado a la electro-neutralidad. Si el análisis de agua no es balanceado, es recomendable la adición ya sea de  $\text{Na}^+$  o  $\text{Cl}^-$  para alcanzar la electro-neutralidad (Dow Chemical Company, 2010).

Una vez en servicio el sistema de membranas, el agua de alimentación debe ser analizada de manera regular para que tanto el pre-tratamiento como la operación de la planta se puedan ajustar de manera acorde a ésta, ya que un sistema de pre-tratamiento inadecuado puede impactar severamente en el desempeño del proceso. De hecho, la mayoría de las fallas de los sistemas de ósmosis inversa usualmente son el resultado de un diseño o desempeño pobre de dicho sistema de tratamiento, por lo que resulta de vital importancia que éste satisfaga el servicio que se pretende atender (World Health Organization, 2007). A este respecto, una ventaja de los sistemas de ósmosis inversa que tratan aguas salobres, como se cita en su análisis técnico-cuantitativo, es que requieren un pre-tratamiento muy limitado, que incluye únicamente la adición de inhibidor de incrustaciones y filtración por cartuchos (Wilf, 2010).

#### **5.3.1.3 Post-tratamiento del agua desalada**

El agua producto, o desalada, de las plantas desaladoras es característicamente baja en contenido mineral, alcalinidad y pH. Por ello debe de ser acondicionada (post-tratada) antes de su distribución y uso finales para darle la calidad requerida, ajustando el pH, re-endurecimiento y desinfección. Típicamente, el post-tratamiento del agua producto incluye uno o más de los siguientes procesos:

- Estabilización mediante la adición de alcalinidad de carbonato
- Inhibición de corrosión
- Re-mineralización mezclándose con agua con alto contenido mineral
- Desinfección
- Pulido de la calidad del agua de alimentación para la remoción de compuestos específicos (por ejemplo: boro, óxido de silicio, etc.)

El post-tratamiento del permeado producido por los sistemas de desalación es necesario por dos razones clave: para proteger la salud pública (por desinfección y adición de minerales) y para salvaguardar la integridad del sistema de distribución de agua. En algunos casos el mismo proceso de post-tratamiento y los químicos de acondicionamiento permiten lograr ambos objetivos (World Health Organization, 2007).

## **5.3.2 Requerimientos energéticos**

### **5.3.2.1 Electricidad**

La energía eléctrica consumida por el proceso es principalmente para bombeo. En sistemas para agua de mar, usualmente, la unidad de bombeo de alta presión es la que tiene mayor contribución en el consumo combinado de energía (alrededor del 85%) (Wilf, 2010). No obstante, los esfuerzos por mejorar este proceso en los últimos tiempos, han permitido reducir significativamente la presión neta impulsora (PNI) necesaria para llevar a cabo la separación de la sal del agua, por lo que sus necesidades eléctricas han disminuido. Esta presión, necesaria para cualquier aplicación de ósmosis inversa, es función tanto del cambio en la presión osmótica como de la resistencia hidráulica, y es influenciada por el factor de concentración y, por tanto, por la recuperación (R), pues ésta describe la eficiencia del proceso en términos de rendimiento. La temperatura también tiene un impacto en el consumo de energía de las bombas de alimentación, por la dependencia que de ésta tiene el flujo, lo que también impactará a la presión neta impulsora, pues el flujo aumenta a medida que dicha presión lo hace (Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior, 2003).

Esto explica y da más validez a la propuesta del capítulo III de emplear el agua salobre del acuífero San Quintín como agua de alimentación a la planta, pues la menor concentración de sales de este tipo de agua como alimentación a la planta implica una presión osmótica más baja, lo que, a su vez, demandaría menos energía al proceso, teniéndose un consumo eléctrico mucho más bajo que en la desalación de agua de mar, con lo cual el impacto ambiental se reduciría hasta la mitad, tanto por emisión de gases de efecto invernadero por cada metro cúbico de agua desalada, como por desequilibrio ecológico al entorno por el desecho de la salmuera, cuya concentración de sal también sería más bajo que en el caso de agua de mar (Muñoz & Fernández-Alba, 2008).

Aun así, en la selección de las bombas de agua de alimentación se debe de tener como principal objetivo una elevada eficiencia tanto del motor como de la bomba. Actualmente es común el empleo de motores de frecuencia variable en plantas de agua salobre, cuyas bombas de alimentación requerirán de entre 0,5 a 2 kWh/m<sup>3</sup> (Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior, 2003).

## **5.4 Conclusiones**

La desalación de agua es una actividad del ser humano que, como cualquier otra, es capaz de repercutir negativamente en el medio ambiente, motivo por el cual resulta de vital importancia que se apliquen las medidas adecuadas de monitoreo y prevención para mitigar tales afectaciones. Ello ha de hacerse desde la conceptualización de este tipo de proyectos, en cuya labor hay que destacar la relevancia que tiene una apropiada selección de la tecnología de desalación, que mejor



se adapte a las características específicas del sitio en cuestión, en función de los recursos disponibles como energía y agua de alimentación, y también la calidad del agua producto necesaria, considerando además la demanda energética del proceso y la disposición de efluentes o corrientes de desecho.

Con esto presente fue que se realizó la selección tecnológica, y después de evaluar las dos familias más comerciales de desalación, membranas y destilación, se eligió a la ósmosis inversa como la tecnología que mejor puede cumplir con lo que este trabajo pretende, pues las características técnicas del proceso están acordes con lo antes dicho, como lo son la forma de energía que emplea, consumo energético, capacidad, nivel de salinidad que puede tratar, y la calidad del producto que proporciona.

No ocurre lo mismo con las tecnologías de destilación, ya que no resultan apropiadas si los volúmenes de producción de agua desalada son pequeños, cuando el agua a desalar es de bajo contenido de sales, como la salobre del acuífero San Quintín, o cuando no hay abundancia o buena disponibilidad de combustibles para su operación; dada su gran capacidad, son rentables prácticamente sólo cuando se emplean para cogeneración de agua y electricidad, por los altos costos de inversión que representan y elevada demanda energética.

Adicionalmente, al emplear solamente electricidad, la ósmosis inversa empata perfectamente con la fuente de energía seleccionada en el capítulo IV, la generación eléctrica a partir del viento, para cuya transmisión actualmente se cuenta en sitio con infraestructura que probablemente no requeriría de fuertes modificaciones o grandes inversiones.

También hay que recalcar que cuando se desalan aguas salobres por ósmosis inversa se tienen ahorros en energía y, a su vez, menores emisiones contaminantes, pues el menor contenido de sales implica una presión osmótica a vencer menor, con lo que la capacidad de la bomba de alta presión no deberá ser tan grande, a su vez que la temperatura de operación de este proceso es la más baja, ocasionando, un impacto ambiental mínimo al momento de descargar sus corrientes de desecho. No obstante, el correcto funcionamiento de esta tecnología es muy dependiente de la calidad del agua de alimentación, por lo cual el pre-tratamiento de la misma es un tema fundamental para el proceso para garantizar su tiempo de vida, correcto funcionamiento y, por tanto, la calidad de su producto, así como también bajos costos operativos, principalmente por concepto de energía, y costos de mantenimiento contenidos.

# VI. INGENIERÍA CONCEPTUAL: ESPECIFICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPO

## 6.1 Diagrama de Flujo del Proceso de Ósmosis Inversa

El agua de alimentación es bombeada desde el pozo o la toma de entrada hasta el sistema de pre-tratamiento, para posteriormente ser elevada su presión por la bomba de alta presión y llegar al arreglo de membranas, para separarla en una corriente de permeado y otra de concentrado. La primera sale del arreglo de membranas a una presión ligeramente superior a la del ambiente, mientras que la de concentrado, pese a que se sufrirá caídas de presión en cada etapa atravesada, aun poseerá mucha energía que puede ser recuperada por medio de dispositivos recuperadores de energía. Por su parte, el permeado se almacena después de haber pasado por el sistema de post-tratamiento, en donde es reacondicionado para darle las características que su uso requiera.

La capacidad y recuperación del sistema están determinadas por la configuración del arreglo de los recipientes horizontales en los que están contenidas las membranas, el cual arreglo puede ser en serie o en paralelo.

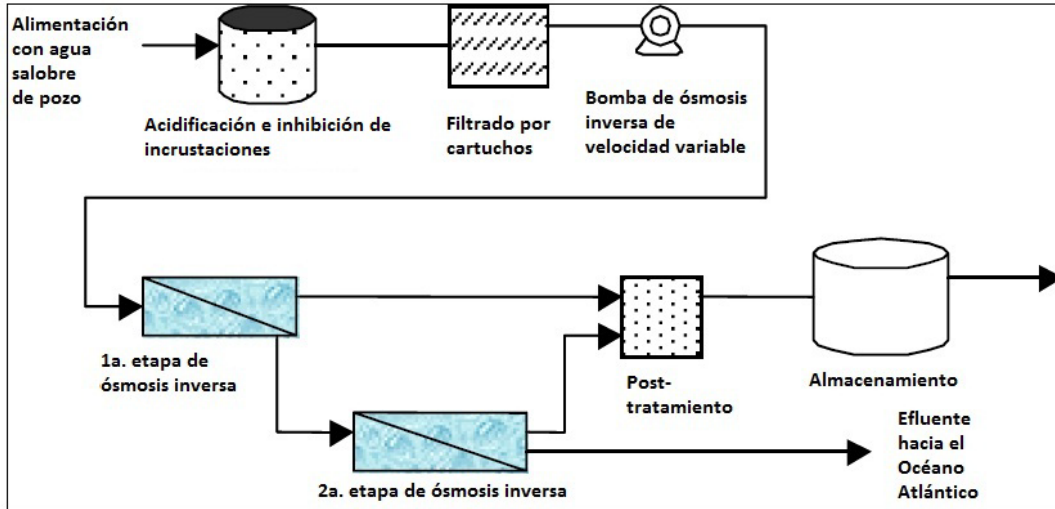


Figura 6.1 Ejemplo de Diagrama de Flujo de Proceso de una planta de ósmosis inversa  
Fuente: Planta de ósmosis inversa de Dare County, Carolina del Norte, EE.UU.

## 6.2 Variables de proceso de la ósmosis inversa

El flujo y el paso de sal son los dos parámetros clave descriptivos de las membranas de ósmosis inversa que afectan el desempeño de la membrana, por lo que las razones de recuperación de estos sistemas oscilan entre el 75% y el 85% debido a lo que se explica enseguida.

### 6.2.1 Recuperación

Es la variable más importante del proceso de ósmosis inversa, y es la relación entre la velocidad del flujo de permeado y la del flujo de alimentación para un elemento simple de membrana, de la cual dependen en gran medida las demás variables. Como ya se mencionó, indica la proporción del agua de alimentación que es recuperada como agua producto o permeado, definiéndose como:

$$R = 100\% \left( \frac{Q_p}{Q_f} \right)$$

En donde R es la tasa de recuperación, en porcentaje,  $Q_p$  es la velocidad de flujo de permeado y  $Q_f$  es la velocidad de flujo del agua de alimentación. En tratamiento de aguas salobres, es función de la química del agua. Afecta el paso de la sal, el flujo de permeado y la presión neta impulsora. El paso de sales relaciona la calidad del agua producto para un ión específico o sólidos disueltos totales (TDS) y está expresado como un porcentaje.

Diversos mecanismos impiden el paso de las sales a través de la membrana, referido como rechazo de sal. Las propiedades del agua de alimentación que influyen mayormente en el rechazo de sal por la membrana son (Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior, 2003):

- *Valencia iónica.* El rechazo se incrementa con el número de valencia; iones divalentes y trivalentes son mejor rechazados que los iones monovalentes.
- *Tamaño molecular.* El rechazo aumenta a medida que también lo haga el tamaño molecular.
- *Tendencia del hidrógeno a formar enlaces.* El rechazo disminuye para compuestos con fuertes enlaces de hidrógeno (por ejemplo, agua y amoníaco).
- *Gases disueltos.* Los gases son permeables en su estado libre (como el dióxido de carbono y el sulfito de hidrógeno).

### **6.2.2 Flujos de solvente y soluto**

El flujo de solvente es la velocidad con la cual el éste pasa a través de una unidad de área de la membrana y usualmente está expresado en litros por metro cuadrado por hora (L/m<sup>2</sup>/h). Es función de la presión, que juega un rol importante en dicho flujo, caso contrario para el flujo de soluto, donde no existe componente de presión. Al incrementarse la presión, la velocidad de permeabilidad del solvente se incrementa, pero el flujo de soluto permanece constante, con la consecuente mejora de la calidad del agua producto. No obstante, es muy importante el mantener velocidades de flujo de alimentación y concentrado adecuadas, ya que si se asigna un valor muy elevado, la acumulación de sales en la cara de alimentación de la membrana será muy grande, mientras que la otra, al tener pocas sales, generará una diferencia de concentración de sal muy elevada entre ambas caras, lo que ocasionará que el flujo de sal a través de la membrana se incremente, ya que la ecuación de flujo de soluto indica que éste es proporcional a la diferencia de concentración de soluto entre ambas caras de la membrana, deteriorándose la calidad del permeado, y dando lugar a mayor propensión a precipitar de algunos compuestos. Además, lo anterior también ocasionará que la presión osmótica se incremente muy por encima del nivel de la corriente de alimentación, con lo que la presión neta impulsora se reducirá, por lo que habrá que tener especial atención también a las caídas máximas de presión (Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior, 2003).

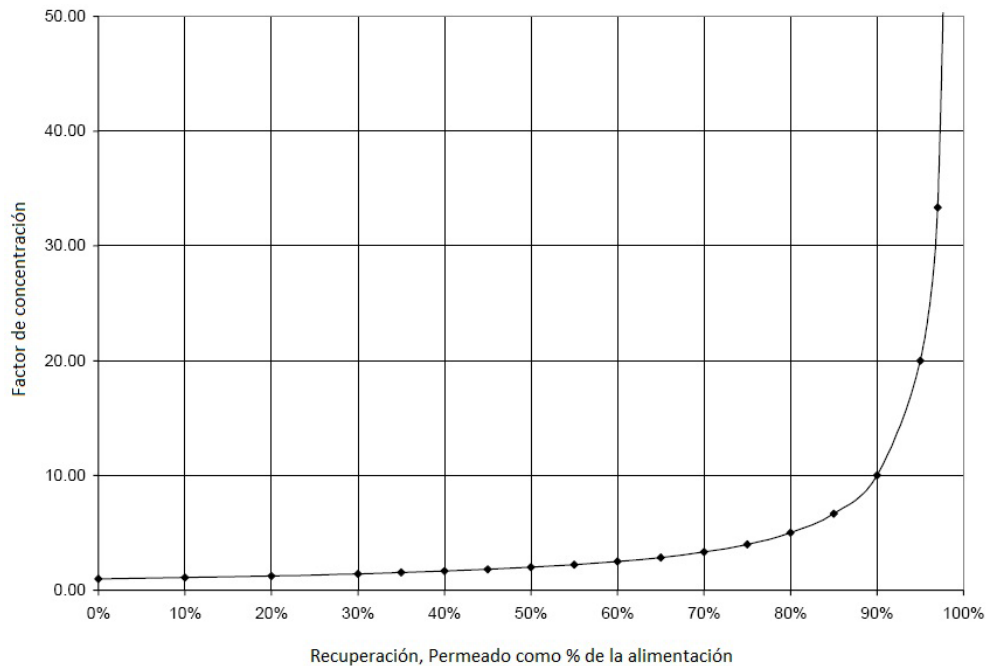
### **6.2.3 Factor de Concentración**

La recuperación también controla el factor de concentración de soluto, CF:

$$CF = \frac{1}{(1 - R)}$$

Donde:  $R$  = Recuperación expresada como fracción

En la gráfica 6.1 se muestra el factor de concentración como función de la recuperación, bajo el supuesto de una membrana perfecta. Usando estos valores se tendrá un diseño algo conservador (Bureau of Reclamation. United States Department o the Interior, 2003).



**Gráfica 6.1 Factor de concentración del soluto como función de la recuperación**  
**Fuente: Desalting Handbook for Planners, 2003**

#### 6.2.4 Otras variables

Otras variables de proceso a tener en consideración, son (Bureau of Reclamation. United States Department o the Interior, 2003):

- *Velocidad de alimentación por recipiente.* También impactará en los requerimientos de presión de alimentación, al influir en las caídas de presión del sistema. Establece la velocidad de flujo cruzado y afecta la polarización de concentración.

- *Flujos mínimos del concentrado.* Es muy importante considerar el flujo a través de la superficie de la membrana para controlar la polarización de concentración.
- *Calidad del agua producto.* Puede ser afectada por la selección del tipo de membrana y el flujo.
- *Temperatura.* Es muy importante en la etapa del proceso de diseño, debido a que ésta tiene una influencia significativa en el flujo y, por lo tanto, en los costos de capital y de operación. Sin embargo, la temperatura de las aguas subterráneas es relativamente constante.

### **6.3 Dimensionamiento de la desaladora**

Dado que, como se ha mencionado anteriormente, el tema de la desalación de agua ha tomado un papel importante para satisfacer las necesidades que del recurso se tienen en todos los ámbitos de la vida diaria del ser humano, los proveedores de equipo, en su búsqueda por atraer y afianzar a una mayor cantidad de clientes, han comenzado a optar por brindar una atención más personalizada poniendo a disposición diferentes recursos con los cuales sus potenciales compradores puedan definir de manera más fácil y rápida los equipos que cubran sus necesidades. Algunos de estos recursos son fórmulas para realizar cálculos analíticos o simuladores computacionales del proceso, que permiten definir las características que habrá de tener el sistema con base en las entradas o posibilidades del cliente y a las salidas que el mismo requiere obtener y que permitirán el posterior dimensionamiento del resto o, por lo menos, de parte de la planta e, incluso, que brindarán la posibilidad de realizar también un primer análisis de costos.

El dimensionamiento de la planta se orienta a definir su capacidad adecuada para satisfacer un porcentaje del volumen de agua necesitado.

#### **6.3.1 Capacidad de la planta**

En este caso ha sido determinada a partir de la necesidad actual que del recurso se tiene en la región, así como también considerando diversos factores que influyen de una u otra manera en los objetivos planteados en este trabajo. Para ello se investigó, solicitó y revisó información oficial, tanto federal como local, de la zona de estudio.

Los criterios que fueron considerados en el cálculo de la capacidad de la planta, de la proyección de la demanda, y en el resto del desarrollo del presente capítulo, son:

1. La superficie de cultivo regional, la que corresponde a superficie de riego y de ésta la que es sembrada anualmente.

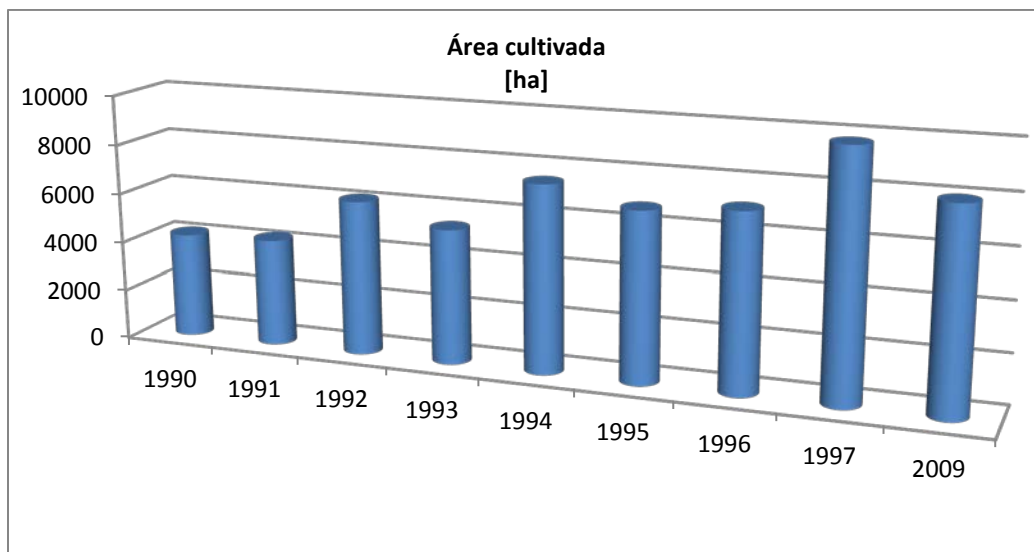
2. Los cultivos sembrados en la zona de estudio, los cultivos de riego, y la superficie de riego sembrada anualmente de cada uno de ellos.
3. El calendario de riego de los cultivos más representativos por superficie sembrada e importancia económica en el sitio.
4. El volumen de agua empleado anualmente para riego agrícola en la región.

La planta desaladora tendrá una capacidad para producir 0,03 metros cúbicos de agua desalada por segundo, es decir, 108.000 litros por hora, o 2.592 metros cúbicos diarios, volumen suficiente para satisfacer la demanda de agua diaria de aproximadamente 15 unidades de riego, cuyo tamaño promedio sea de 20 hectáreas, con base en la información presentada a continuación.

#### **6.3.1.1 Proyección de la demanda**

Partiendo de la información presentada en el capítulo II, en el apartado 2.2.3.1 *Agricultura*, de las 22.625 hectáreas sembradas en 2009 se consideró que el 37,3% correspondió a superficie de riego, unas 8.439 hectáreas. Esa cantidad estimada resulta ser bastante aproximada a la proporcionada por la Coordinación de Información y Estadística del Distrito de Desarrollo Rural 001-Ensenada, de 7.649 hectáreas, y también con la calculada a partir de la información proporcionada por el Sistema de Información Alimentaria y Pesquera (SIAP) del gobierno federal, de 8.010 hectáreas; es este último valor el tomado como base para realizar todos los cálculos necesarios en la estimación de la demanda de agua en la zona de estudio, al resultar ser el valor intermedio de las tres cifras anteriores. La diferencia entre los valores calculados y el proporcionado por el SIAP ha sido considerado como la proyección de la demanda, para incluir de manera implícita este parámetro en los cálculos pertinentes, debido al hecho de que no se pudieron conocer datos exactos del origen de todos los cultivos, es decir, el porcentaje de su superficie sembrada que es de riego o de temporal, por lo que para los que no se obtuvo información se consideraron las mismas proporciones de superficie de riego y de temporal de todo el valle, obteniéndose un valor de superficie de riego total sembrada mayor a los datos oficiales, pero que, como se ha dicho, es tomado en consideración como el margen de la proyección de siembra.

En la gráfica 6.2 se aprecia la variación en la superficie de riego sembrada a lo largo de los años, y se observa que la superficie actual está dentro del rango de dicha gráfica.



**Gráfica 6.2 Superficie de riego sembrada anualmente en San Quintín**

**Fuente:** Aguirre, et ál., 2001; Secretaria de Fomento Agropecuario del Estado de Baja California, 2010

En el supuesto de que se sembrara la totalidad de la superficie de riego de una sola vez, 16.062 hectáreas, se requerirían de aproximadamente 170 millones de metros cúbicos de agua por año, que son más de 460 mil metros cúbicos diarios. Sin embargo, esto no ocurre por varios factores. Uno de ellos son las características de cada cultivo, como la estacionalidad o la misma demanda de agua, ésta última comprende tanto la periodicidad como la lámina de riego o volumen mínimo de agua necesario para un desarrollo de la planta y volumen de producción adecuados. Estos requerimientos son resumidos en un documento conocido como calendario de riego, el cual es específico del cultivo en cuestión, en función también de la localización geográfica y las características de la región.

En este trabajo únicamente fueron considerados los cultivos más importantes en la región, citados en el capítulo III, así como sus respectivos calendarios de riego. Estos son: jitomate, fresa, alfalfa, calabacita, cebolla, chile verde, col de bruselas, pepino, cebada, sorgo, trigo y maíz. Debido a que no se contó con los calendarios de riego específicos de todos los cultivos sembrados en la zona de interés para calcular el volumen demandado de agua, se calculó un estimado a partir de calendarios de riego generales, suposiciones y aproximaciones, de la información disponible.

Dado que el volumen de agua que demandaría la superficie de riego sembrada calculada para el año 2009 en 8.010 hectáreas, es demasiado grande, al ser aproximadamente de más de 230 mil metros cúbicos diarios, se optó por limitar también la superficie de riego cultivada de acuerdo a los ciclos agrícolas, que son primavera-verano y otoño-invierno, para poder acotar la capacidad de la planta, buscando satisfacer solamente la demanda mínima de agua correspondiente a un porcentaje del total de superficie irrigada para el mes en el que se presente su mayor demanda, en el ciclo agrícola más seco, de conformidad a los objetivos y al alcance de este trabajo, y para



adecuar esta propuesta a las capacidades tecnológicas y financieras de los posibles interesados. Así, se ha considerado abastecer la demanda mínima de agua de 15 unidades de riego en el mes de abril, que es cuando se requiere el mayor volumen de agua en todo el año pese a que no se presentan las temperaturas ambientales más elevadas, pero si se tiene la mayor superficie de riego sembrada. Dicha demanda mínima se estimó en 30 litros por segundo, para regar 81 de 300 hectáreas que, en conjunto, sumarían sus superficies si se les considerara del tamaño promedio de 20 hectáreas cada una, citado en el capítulo III, con lo que se atendería al 1,87% del total de superficie de riego del valle de San Quintín, lo cual le da como ventaja a esta propuesta el ser de un tamaño apropiado para atender a un número pertinente de beneficiarios sin requerirse cantidades enormes de energía y que la planta pueda ser fácilmente instalada en locaciones pequeñas y aisladas, debido en parte al menor tamaño de sus componentes que facilitaría su traslado al momento de la construcción, y a la posibilidad de modularización. Por otro lado, abre la posibilidad de que en un futuro pueda ser alimentada por fuentes renovables distintas a la eólica y que actualmente resultan poco viables por sus costos de inversión o limitada capacidad de generación, como la solar.

### **6.3.2 Equipo principal**

El sistema completo de desalación de agua por ósmosis inversa (OI) está compuesto de tres secciones: de pre-tratamiento, de elementos de membrana y de pos-tratamiento.

El sistema de membranas incluye un set de elementos de membrana, alojados en recipientes a presión arreglados de manera específica y que son alimentados mediante una bomba de alta presión. Este sistema es en sí una planta completa con una entrada para el agua de alimentación y salidas para el permeado (producto) y el concentrado (salmuera); por este hecho es que, para los fines y el alcance de este trabajo, es considerado como el equipo principal del proyecto propuesto, motivo por el cual el desarrollo precedente de este capítulo está enfocado en el dimensionamiento y especificación de tal sistema, pero también se presenta un análisis preliminar sobre las condiciones para hacer una propuesta de aerogenerador y su respectiva ubicación. Vale la pena mencionar que, además, varios fabricantes de equipos de desalación ofrecen plantas modulares que integran los sistemas de pre y post-tratamiento e incluso otros más han desarrollado tecnologías de membranas que ya no requieren de un sistema de pre-tratamiento, sobre todo cuando se trabajará con aguas salobres y de pozo.

Por otro lado, en contraste con los procesos térmicos de los que se obtiene agua que prácticamente no contiene sólidos disueltos y que, por tanto, en muchas de sus aplicaciones hace obligatorio el incluir un sistema de post-tratamiento para devolverle al agua producto algunas de sus propiedades fundamentales, el permeado de los procesos de membranas contiene mayor proporción de estos sólidos, lo cual puede eliminar la necesidad de un post-tratamiento, al estar dichas características en un rango adecuado para los fines aquí propuestos, y no requerir tampoco de un tratamiento para fines de consumo humano, industrial, farmacéutico o de alimentos.

### **6.3.2.1 Diseño del sistema de membranas de ósmosis inversa**

El objetivo principal al diseñar un sistema de ósmosis inversa es lograr minimizar las presión de alimentación y los costos de las membranas para el flujo de permeado requerido, pero maximizando la calidad de éste último y su recuperación, por lo que el diseño óptimo depende de la importancia relativa de estos aspectos. Si se conocen las condiciones de operación, puede calcularse la calidad del permeado.

Como se ha comentado, la recuperación de los sistemas de agua salobre está limitada por la solubilidad de las escasas sales solubles, y la recuperación máxima independientemente estará en torno al 90%, en función también del tipo de membrana seleccionada, que es, principalmente, la que brinda el rechazo de sales deseado y, por tanto, las diferentes calidades de agua desalada. Sin embargo, mientras mayor rechazo de sales brinde una membrana, mayor será la presión de alimentación requerida bajo las mismas condiciones de operación, lo que puede implicar un aumento considerable en la energía consumida por el sistema. La presión de alimentación necesaria para producir el flujo de permeado requerido para una membrana específica, depende del flujo de permeado de diseño (razón del flujo de permeado por unidad de área de la membrana). A mayor flujo de permeado por unidad de área activa de la membrana, mayor la presión de alimentación. En la práctica se ha observado que el límite de flujo a considerarse en el diseño del sistema depende de la tendencia de la membrana a taparse por las partículas y el material coloidal presentes en el agua de alimentación que se depositan y originan una capa de elevada concentración de sales del lado de la alimentación de la membrana, por lo que tal tendencia es el factor de mayor influencia en el diseño del sistema de membranas y el flujo de permeado tiene una de las mayores consideraciones en el diseño de la configuración de la membrana, ya que dicha concentración puede alcanzar niveles muy por encima de los de la corriente principal de entrada, pudiendo causar varios problemas, como la reducción de la NPD, resultado de un incremento de la presión osmótica en la superficie de la membrana respecto de la de la corriente de alimentación; deterioro de la calidad del permeado debido al incremento del gradiente de concentración de sal entre ambos lados de la membrana; o mayor propensión de los compuestos de calcio a precipitar, al aumentar su concentración. Por todo lo anterior resulta muy conveniente el mantener velocidades de alimentación y de concentrado adecuadas en la unidad, así como apoyarse o apegarse a las recomendaciones o sugerencias de diseño del fabricante de la membrana sobre velocidades de flujo mínimo, caídas máximas de presión y demás temas relacionados al diseño del sistema.

### **6.3.3 Diseño**

Dada la amplitud de métodos existentes para realizar el diseño de un sistema de ósmosis inversa, en la realización de esta propuesta de ingeniería conceptual, y dados los alcances de la misma, se decidió emplear para el proceso de diseño el siguiente método desarrollado por la empresa The Dow Chemical Company, dedicada a la fabricación de elementos para este tipo de sistemas,

mediante el cual puede obtenerse, a partir del conocimiento de datos básicos de las condiciones de sitio en las cuales operará la planta, de cálculos analíticos sencillos y de una simulación computacional no muy compleja, el diseño de dicho sistema.

Se parte de la información básica de las condiciones de sitio para realizar los cálculos analíticos, y los resultados que de éstos se obtienen así como la información en ellos empleada son una primera aproximación al diseño final, ya que éste también está en función del balance de materia-energía del sistema, por lo que la realización de dicho balance implicará un aumento o disminución de la capacidad y o configuración final del proceso, debido a la total dependencia del proceso hacia algunos parámetros empleados en tal balance, recurriéndose al modelado computacional del sistema para corroborar los resultados analíticos obtenidos y observar su funcionamiento para las condiciones de operación dadas así como también para acelerar y agilizar el diseño. Con este último paso se obtiene un pre-diseño del sistema, y con la iteración de todo el proceso de diseño se obtendrá el diseño final.

#### **6.3.3.1 Pre-diseño**

El pre-diseño que se obtuvo fue corregido y modificado, para derivar en el diseño final del sistema. En seguida se presenta, en primer lugar, el desarrollo de los cálculos analíticos y, posteriormente, la simulación computacional.

##### **6.3.3.1.1 Cálculo analítico**

El método empleado permite realizar un bosquejo del sistema, por lo que es muy importante el señalar que los resultados que son obtenidos por métodos preliminares o aproximados requieren ser evaluados y corroborados por medio de cálculos posteriores mucho más precisos, los cuales habrán de tomar en cuenta información más completa y detallada sobre las condiciones reales bajo las cuales operará el sistema.

Para el desarrollo de esta parte analítica se requiere conocer la siguiente información básica sobre algunas condiciones iniciales y de operación:

- ✓ Tipo de agua de alimentación (salobre o salada).
- ✓ Fuente de agua de alimentación (pozo, toma abierta en mar, etc.)
- ✓ Salinidad del agua de alimentación en ppm.
- ✓ Volumen requerido de agua desalada.
- ✓ Número de elementos que contienen los recipientes a presión.
- ✓ Definir si será flujo con recirculación de concentrado o sin recirculación (plug).
- ✓ Diámetro de los elementos de membrana a emplear.

En el *Apéndice B* se presenta el desarrollo de tales cálculos para la propuesta hecha en este trabajo, antecedidos por la información necesaria sobre las condiciones del sistema.

#### **6.3.4 Simulación numérica**

El empleo de programas computacionales que permiten modelar procesos se ha vuelto una constante en ya que permiten acelerar y agilizar el diseño de procesos. De ellos se obtiene, como salidas, información de la operación de todos los elementos que conforman el sistema, que permite visualizar el comportamiento del sistema ante las variaciones en sus entradas, para identificar más fácil y rápidamente los puntos en los cuales ha de ser modificado para obtener su máxima eficiencia, por lo cual es necesario realizar múltiples iteraciones para cada uno de los parámetros del proceso, para darle flexibilidad operativa a la planta que le permita operar en un rango de fluctuación permisible de tales parámetros si éstas llegasen a presentarse sin afectar considerablemente la calidad de sus salidas, ya que, al provenir el agua de alimentación de una fuente natural, es muy propensa a experimentar variaciones ante los cambios que pudieran darse en el entorno.

El simulador que empleado, ROSA (Reverse Osmosis System Analysis), fue proveído también por el fabricante citado y requiere de los siguientes datos básicos para realizar el modelado del sistema:

- ✓ Fuente del agua de alimentación
- ✓ Volumen de agua desalada requerido
- ✓ Temperatura del agua de alimentación
- ✓ pH del agua de alimentación
- ✓ Contenido de TDS del agua de alimentación
- ✓ Número de recipientes a presión
- ✓ Número de elementos de membrana por cada recipiente
- ✓ Número de etapas
- ✓ Tipo de elemento de membrana

##### **6.3.4.1 Descripción del modelado realizado**

Los resultados analíticos obtenidos en el apartado anterior son las entradas del simulador, en base a los cuales se realizó una primera simulación que permitió confirmar la validez de dicha información o realizar las modificaciones pertinentes en los parámetros de diseño y de operación del sistema de acuerdo a las salidas del programa, realizándose este ciclo hasta obtener un funcionamiento y desempeño adecuado del sistema, ya que muchos de éstos parámetros son totalmente dependientes del entorno, por lo que no puede tenerse un control absoluto sobre ellos o conocimiento exacto sobre su variación futura, por lo que únicamente podrían aplicarse

medidas previsoras o mitigadoras de sus efectos que, en su caso, deben ser tomadas justamente en la fase de diseño del sistema de desalación.

Así pues, las variables mencionadas son la temperatura, la calidad del agua de alimentación, el flujo de permeado requerido así como también una de las variables de operación del proceso que resulta ser el tipo de membrana empleado, con el objetivo de observar su influencia en el desempeño del mismo, en concreto, en el consumo energético (potencia y energía específica), en la calidad o contenido de TDS del permeado así como del concentrado o salmuera.

Se consideraron como intervalos de variación de estos parámetros y fueron empleados para el modelo computacional y, por consiguiente, para el diseño del sistema, las cifras dentro del entorno de sus valores promedio y o máximos y mínimos reportados en la literatura. En lo que respecta al tipo de membrana, se consideraron únicamente dos tipos como los más adecuados para cumplir con los objetivos planteados, un modelo de muy bajo consumo energético con un nivel de rechazo de sales no muy bueno pero sí aceptable, y otro modelo con un desempeño equilibrado entre consumo energético y rechazo de sales. Los rangos son los enlistados a continuación:

- ✓ Temperatura: de 16°C a 23°C
- ✓ Flujo de permeado: de 108 m<sup>3</sup>/h a 119,26 m<sup>3</sup>/h
- ✓ TDS del agua de alimentación: de 527 ppm a 9.400 ppm
- ✓ Membranas: XLE-440 (bajo consumo energético, rechazo aceptable de sales) y HRLE-440i (equilibrio entre consumo y rechazo).

#### **6.3.4.2 Parámetros de diseño y de operación**

Los parámetros de diseño son las variables o condiciones de sitio cuya consideración es de suma importancia al momento de diseñar un sistema de esta índole, porque al fluctuar su valor cambiará el desempeño del sistema o, incluso, su diseño mismo.

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta etapa del proyecto propuesto, los parámetros de diseño de la planta desaladora y el aerogenerador son el viento, ya que de este depende la cantidad de electricidad que puede llegar a generarse así como la selección del aerogenerador; el agua de alimentación, pues de ésta dependerá casi totalmente el diseño del sistema de desalación y, una vez diseñado, las variaciones en sus características afectarán positiva o negativamente la calidad del permeado, la energía demandada por la planta y el tiempo de vida de los componentes del sistema.

La razón por la cual se decidió elegir tales variables como las principales a abordar en este trabajo recae en que tanto el consumo energético como el tipo de membrana a emplear están relacionados con los costos operacionales de la planta y con la calidad del producto. Por otro lado, aunque el concentrado es un efluente, es muy importante monitorear su calidad debido al

impacto ambiental potencial que podría implicar su disposición, mientras que el monitoreo del contenido de TDS del agua de alimentación permite asegurar la calidad del producto.

#### **6.3.4.2.1 Agua de alimentación**

##### **6.3.4.2.1.1 Composición**

La única información existente y, además, poco precisa, sobre la composición química del agua del acuífero San Quintín, es la que fue proporcionada por la Comisión Nacional del Agua para este trabajo, y data de estudios técnicos realizados entre los años 1973 a 1987, ya que por el alto costo implicado, no se cuenta con estudios o muestreos físico-químicos recientes. Consiste en información hidro-química que fue determinada tomando en cuenta las características geológicas de las formaciones existentes en el área, con lo que se pudo establecer la procedencia iónica de las muestras de agua en su tránsito por las formaciones permeables del valle (Comisión Nacional del Agua, 2010).

La composición del agua salobre puede variar ampliamente entre una fuente y otra debido a que ésta es totalmente dependiente de su localización; por lo cual, ante la falta de información precisa sobre la composición química del agua del acuífero San Quintín, por no contarse con un análisis del recurso, se supuso una composición teórica, con contenido total de TDS de 3.461.38 ppm, que se muestra en la tabla C.2 del apéndice C. Sin embargo, para las etapas subsecuentes de este proyecto resultaría mandatorio realizar un análisis detallado del agua de alimentación, para conocer con detalle esta y otra información imprescindibles.

##### **6.3.4.2.1.2 Temperatura**

Al igual a lo que ocurre con los análisis de agua del acuífero San Quintín, actualmente no hay disponible información sobre la temperatura de sus aguas ni de la temperatura media del mar de las costas de esta locación, de modo que para el diseño de la planta desaladora se consideró la información disponible de la región más próxima a la zona de estudio, que es Punta San José, y cuyas aguas se encuentran a poco más de 100 kilómetros al norte, pero ambas son influenciadas por la Corriente de California, que son masas de agua fría provenientes de Alaska y que ocasionan temperaturas oceánicas bajas. Por lo anterior, durante el periodo veraniego, que abarca los meses de mayo a septiembre, la temperatura del mar oscila entre los 18,33 °C y los 20°C, mientras que durante los meses invernales, de octubre a abril, la temperatura se ubica entre los 10°C y los 15,55°C.

Por lo tanto, en este trabajo se consideró el promedio de la temperatura media de los periodos de verano y otoño, para el diseño del sistema propuesto, fijándose esta variable en 16°C.

#### **6.3.4.2.1.3 Flujo del permeado**

El flujo del permeado también desempeña un papel importante en el diseño, como se citó en los temas antecedentes, ya que mientras mayor sea su valor, menor será la cantidad de TDS del permeado, pero esto requeriría de una mayor presión de alimentación lo que implica un aumento en el consumo eléctrico, y también aumentará la rapidez con la que el elemento de membrana se tape, requiriendo limpieza más frecuentemente.

#### **6.3.4.2.2 Tipo de elemento de membrana**

En cuanto a tipo de membranas, como ya ha sido mencionado anteriormente, existen distintos modelos que permiten obtener diferentes calidades de permeado y consumos energéticos, de los cuales dependen totalmente los costos de operación y mantenimiento de la planta así como también la calidad del producto.

### **6.3.5 Resultados**

Los resultados obtenidos del modelado del sistema propuesto han corroborado y confirmado lo que dicta la teoría sobre un sistema de desalación por ósmosis inversa. En primer lugar, se ha observado la total dependencia, y, por ende, la gran influencia en el desempeño de la planta, a la variación de los parámetros de diseño y de operación del sistema, que son: el contenido de TDS y la temperatura del agua de alimentación y la velocidad de flujo del permeado. También se ha estudiado la influencia del tipo de membrana empleado en el desempeño del sistema. Lo observado se enuncia enseguida:

1. Calidad del agua de alimentación: Todos los parámetros de ella dependientes (TDS del permeado y del concentrado, potencia y energía específica) varían de manera lineal y directamente proporcional.
2. Temperatura del agua de alimentación: Variación lineal y directamente proporcional de la calidad del permeado; variación lineal e inversamente proporcional de la potencia y de la energía específica. Esto es debido a que una mayor temperatura favorece la solubilidad por lo que la separación de la solución en soluto y solvente se vuelve más difícil, mientras que la disminución de la viscosidad favorece el flujo de un fluido, por lo tanto demanda de menos energía para ser impulsado.
3. Flujo de permeado: Variación lineal, inversamente proporcional de la calidad del permeado; variación lineal y directamente proporcional de la energía específica.

La variación del flujo del permeado también tiene un impacto en su calidad, que es inversamente proporcional, de modo tal que al incrementar su valor el primero, disminuirá la cantidad de TDS del producto, pero esto implicará un mayor consumo energético, ya que se requerirá de una mayor presión de alimentación.

4. Tipo de elemento de membrana: Repercute significativamente en la calidad del permeado y en el consumo energético del sistema de membranas.
  - a. Membrana XLE-440 (Bajo consumo energético):
    - i. Consumo eléctrico solamente hasta un 8,2% menor respecto de la membrana de consumo-rechace equilibrado (1,24 kWh/m<sup>3</sup> vs. 1,35 kWh/m<sup>3</sup> o 134,07 kW vs. 146,16 kW).
    - ii. Cantidad de TDS del permeado 2,86 veces superior a la que se obtiene con la membrana de alta recuperación (461,8 vs. 161,52 mg/L).
  - b. Membrana HRLE-440i (consumo-rechace equilibrado)
    - i. Consumo eléctrico superior no más del 8,9% de la membrana de bajo consumo energético.
    - ii. Contenido de TDS del permeado es sólo el 35% del obtenido con la membrana de bajo consumo energético.

#### **6.3.5.1 Diseño final: Conclusiones**

El aumento del flujo de permeado implica un incremento en el flujo del agua de alimentación y su presión, con el consecuente aumento del consumo energético, en contraposición al contenido de TDS del permeado que, en tal caso, disminuirá.

El incremento de temperatura del agua de alimentación tendrá un impacto negativo en la calidad del permeado, pues su contenido de TDS aumentará, pero resultará positivo para el consumo energético, ya que este tenderá a disminuir.

La variación del contenido de TDS del agua de alimentación afectará negativamente a todos los demás parámetros, ya que si éste aumenta se incrementará el contenido de TDS tanto del permeado como de la corriente de concentrado y también el consumo energético.

El comportamiento de los parámetros, arriba descrito, es independiente del tipo de elemento de membrana empleado. La única diferencia estará en sus valores, que serán mayores o menores uno en relación al otro para cada parámetro y tipo de membrana, pues, efectivamente, la membrana de bajo consumo energético tendrá una menor demanda de energía, que, empero, no es significativa en contraste con la calidad del permeado que mediante ella se obtiene, que resulta bastante pobre en comparación con la membrana de relación consumo-rechace equilibrado. Así, de las dos membranas consideradas, se eligió la HRLE-440i debido a que se observa que ésta es la que mejor desempeño le otorga al sistema, en general, con amplia ventaja en casi todos los aspectos y con tan sólo el 9% extra de consumo energético que la membrana de bajo consumo energético.

También hay que mencionar que los resultados obtenidos confirman también que el parámetro más importante en el diseño del sistema de membranas es el flujo de permeado a través de una



membrana, porque éste ha acotado el diseño final del sistema para el rango propuesto de variación de los parámetros principales del mismo.

Por lo anterior, el valor de los parámetros de diseño finales queda fijo en los mostrados en la tabla 6.1:

<b>Membrana HRLE-440i</b>		
	<b>Valores de diseño</b>	<b>Rango de diseño</b>
<b>Temperatura, °C</b>	16	16-22,21
<b>TDS alimentación, mg/L</b>	3461,38	527,49-4.828
<b>Flujo de permeado, m<sup>3</sup>/h</b>	108	108-119,26

Tabla 6.1 Parámetros calculados finales de diseño del sistema de membranas

Para los valores de diseño de los parámetros del sistema, la planta tendrá las siguientes salidas, mostradas en la tabla 6.2:

<b>Potencia, kW</b>	69,65
<b>Energía específica, kWh/m<sup>3</sup></b>	0,64
<b>Tds permeado, mg/L</b>	51,54
<b>Tds concentrado, mg/L</b>	13.674,1
Temperatura, 16°C; TDS 3461,38 mg/L; Flujo Permeado 108 m <sup>3</sup> /h	

Tabla 6.2 Valores medios de salida esperados del sistema de membranas, cuando éste opere a los valores de diseño calculados finales.

Y, mientras el sistema trabaje dentro del rango de diseño, se tendrán los rangos de variación de sus salidas, mostrados en la tabla 6.3:

	TDS, mg/L		T, °C		Flujo, m <sup>3</sup> /h	
	T=16°C; flujo=108 m <sup>3</sup> /h		TDS=3461 mg/L; flujo=108 m <sup>3</sup> /h		T=16°C; TDS=3461 mg/L	
	<b>527</b>	<b>4.828</b>	<b>16</b>	<b>22,21</b>	<b>108</b>	<b>119,26</b>
<b>Potencia, kW</b>	36,28	87,46	69,47	63,61	69,65	81,55
<b>Energía específica, kWh/m<sup>3</sup></b>	0,33	0,76	0,64	0,59	0,64	0,68
<b>TDS permeado, mg/L</b>	1,25	76,94	50,63	78,76	51,51	46,45
<b>TDS concentrado, mg/L</b>	2.098	19.064	13.674	13.589	13.674	13.687

Tabla 6.3 Rango de variación calculado de las salidas del sistema de membranas

De la tabla anterior, puede apreciarse claramente que el factor de mayor peso en el desempeño del sistema de membranas es la calidad del agua de alimentación, motivo por el cual, los valores de salida de demanda energética de este sistema obtenidos cuando el nivel de TDS del agua de alimentación es el máximo del rango de diseño propuesto, son los considerados en el desarrollo del resto de este trabajo, en específico, en el dimensionamiento del aerogenerador y en el análisis económico debido a lo que se explicará más adelante.

No obstante, hay que hacer hincapié en la gran importancia de llevar a cabo un periodo de pruebas tan pronto sea factible realizarlo, para obtener datos confiables que permitan determinar con exactitud la calidad del agua de alimentación a la planta y poder diseñar el sistema de pre-tratamiento adecuado al proyecto, que garantice el correcto funcionamiento de la planta, pues de esto depende la buena calidad del agua producto a los menores costos operativos posibles, en concreto, por demanda energética, de químicos de pre-tratamiento y por refacciones.

### 6.3.5.2 Demanda energética de la planta

De acuerdo a la tabla anterior, el sistema de membranas de la planta desaladora consumirá aproximadamente 0,64 kilowatts-hora por cada metro cúbico de agua que desale, para lo cual se necesitaría suministrar una potencia de aproximadamente 70 kilowatts. Sin embargo, debido a las fluctuaciones que podrían presentar las variables de proceso, estos consumos pueden oscilar entre los 0,33 kilowatt-hora para cada metro cúbico de agua desalada, que demandaría una potencia de 36,28 kilowatts de demanda mínima cuando las condiciones sean lo más favorable, hasta los 0,76 kilowatt-hora por cada metro cúbico de agua y una potencia de 87,46 kilowatts cuando las condiciones de operación sean las más adversas.

En adición a lo anterior, para cálculos preliminares algunos autores consideran 0,05 kWh/m<sup>3</sup> de consumo adicional por parte del equipo auxiliar de la planta; más aparte se deberán de considerar las eficiencias de todos los equipos en los cálculos realizados en las etapas posteriores del proyecto (Wilf, 2010).

#### 6.4 Dimensionamiento del aerogenerador

Del dimensionamiento y capacidad de este equipo dependerán, los costos de inversión y la viabilidad y rentabilidad de la operación del proyecto, por lo cual se convierte en una variable de importancia para este trabajo. En el dimensionamiento se tomaron en consideración la demanda eléctrica del sistema de membranas; el consumo eléctrico de los equipos auxiliares; el potencial eólico de la zona de estudio, que incluye las velocidades anuales de viento nominal, promedio y mínima, y al factor de planta que puede tenerse en el lugar, del cual se realizó una estimación; y, por último, se consideró al fenómeno de pérdidas de electricidad durante su transmisión, suponiendo que la cantidad perdida es del 15% del total que se transmite.

Así pues, se consideraron en los cálculos los valores mostrados en la tabla 6.4, de demanda máxima de potencia y energía específica del sistema de membranas ya que, de presentarse tal demanda, el aerogenerador deberá ser capaz de satisfacerla, pues, de lo contrario, habría que obtener energía de la red eléctrica, con lo que se dejarían de cumplir los objetivos de este trabajo. Además, cuando se presente la demanda máxima será cuando se generarán los mayores costos de operación, impactando significativamente el análisis económico.

<b>Volumen permeado</b>	108 m <sup>3</sup> /h
<b>Potencia planta</b>	87,46 kW
<b>Energía específica</b>	0,8098 kWh/m <sup>3</sup>
<b>Equipo auxiliar</b>	0,05 kWh/m <sup>3</sup>
<b>Pérdidas por kW transmitido</b>	15 %

Tabla 6.2 Parámetros de entrada fijados para el dimensionamiento del aerogenerador

Con los valores anteriores de las entradas y salidas del sistema de ósmosis inversa y las pérdidas por transmisión, se tendrán las demandas de electricidad mostradas en la tabla 6.5:

<b>Demanda energética</b>		
	<b>MWh<sub>máx</sub>/día</b>	<b>MWh<sub>máx</sub>/año</b>
<b>Sistema de membranas</b>	2,0990	881,07
<b>Equipo Auxiliar</b>	0,1296	47,30
<b>Demanda anual total</b>		928,38

Tabla 6.5 Demanda anual de energía calculada del sistema de ósmosis inversa

#### 6.4.1 Potencial eólico para generación eléctrica

Para estimar la electricidad que podría obtenerse a partir del viento que sopla en el sitio, se tomó como referencia el estudio realizado por la CFE en la localidad costera de Guerrero Negro, ubicada en el municipio de Mulegé perteneciente al estado de Baja California Sur, para el cual realizó mediciones horarias de velocidad y dirección de viento de febrero de 1988 a febrero de 1989 (Comisión Federal de Electricidad, 2010). Esta consideración fue hecha debido a que aún no se dispone de estudios detallados más precisos sobre otras regiones de la Península de Baja California.

De dichos estudios se asumirá que la velocidad del viento en la costa del Pacífico de la Península de Baja California es aproximadamente la misma a lo largo de toda la línea costera, de modo tal que al localizarse el valle de San Quintín dentro de dicha delimitación, a no más de 12 kilómetros del mar, se supuso que el potencial eólico no presentará variaciones respecto al de Guerrero Negro. No obstante, este hecho no brinda suficiente certeza para el alcance de las etapas posteriores del proyecto, por lo que sería necesaria, en su momento, la realización de una investigación detallada sobre datos de viento en la zona de estudio o, por lo menos, en alguna que sea aledaña.

Partiendo de dichos supuestos, la región de interés podría ser una zona en la que se tienen vientos fríos procedentes del noroeste, que durante 10 meses al año azotan la vertiente del Océano Pacífico, siendo de marzo a diciembre cuando mayor intensidad alcanzan. Las mediciones horarias hechas de velocidad y dirección del viento indican una velocidad promedio de 7,7 m/s a 40,5 m de altura, con dirección noroeste el 90% del tiempo (Comisión Federal de Electricidad, 2010). La distribución de frecuencias de la velocidad del viento para cada mes del año se muestra en la tabla D.1 y en la gráfica D.1 del *Apéndice D*. Dicha distribución corresponde al periodo de tiempo antes citado.

Los datos de dicho estudio permiten observar el comportamiento mensual y anual del viento, del cual se concluye que en la costa del Pacífico de la Península de Baja California el viento podría llegar a presentar velocidades desde una mínima de 0 m/s y hasta una máxima de 22 m/s. No obstante lo anterior, sus probabilidades de ocurrencia, para ambos casos, son sumamente bajas, así como también las velocidades superiores a 11 m/s, que es la que tiene la mayor frecuencia, a pesar que la velocidad de viento promedio anual es de 7,7 m/s; por lo que se consideró como velocidad nominal de la zona de estudio el valor de 11 m/s en base a la cual será seleccionado el aerogenerador.

Las velocidades mínima y máxima más probables del viento son 3 m/s en el mes de enero, y 17 m/s en el mes de mayo. Además de que se estima un factor de planta medio anual del 23% (Maya, 2007). La tabla 6.6 siguiente condensa la información relevante de lo antes citado.

Velocidad promedio, m/s	7,7
Velocidad de viento nominal, m/s	11
Factor de planta medio anual, %	23
Altura, m	40,5

**Tabla 6.3 Principales características del viento en Guerrero Negro, Baja California Sur**  
Fuente: CFE, 2010

Una vez definido lo anterior, se establecieron las características técnicas y de operación del aerogenerador, con lo cual se pudo hacer una pre-selección del mismo y de su proveedor. Las características en las que se fundamentó tal pre-selección comprenden la potencia nominal, la altura de la torre y, por tanto, del rotor, y sus velocidades de viento nominal y mínima.

## **6.5 Proveedores de equipo**

### **6.5.1 Sistema de ósmosis inversa**

Se ha considerado que lo más conveniente es seleccionar y comprar del catálogo de un proveedor de plantas desaladoras la que más se aproxime a la capacidad y dimensiones calculadas, pues esto implica grandes ahorros en costos por concepto de investigación y desarrollo. Además, en los catálogos de los fabricantes de estos equipos pueden encontrarse plantas modulares cuyas características se ajusten bastante bien a las necesidades particulares, siendo este el caso de esta propuesta.

El proveedor de equipo propuesto es el fabricante alemán ENERCON GmbH, cuya planta modelo EDS BW 2400 para agua salobre se adapta casi totalmente a las necesidades de este trabajo, dado que su capacidad oscila en el rango de los 350 a los 2.800 metros cúbicos diarios, y está compuesta por 4 unidades de ósmosis inversa, 7 contenedores de 20" y una bomba por unidad de ósmosis inversa.

### **6.5.2 Aerogenerador**

Para la búsqueda y selección de proveedores de equipo, se empleo la información contenida en una base de datos mundial sobre equipos de catálogo de los fabricantes de aerogeneradores y sobre granjas eólicas mundiales conformadas por tales equipos.

La lista de proveedores es la que se muestra a continuación en la tabla 6.7, en donde se presentan los fabricantes cuyos equipos mejor podrían ajustarse a las necesidades particulares de esta propuesta, conforme a la información contenida en las tablas 6.5 y 6.6.

FABRICANTE/PAÍS	MODELO	Potencia Nominal	Rotor			Torre	
			Velocidad viento			hub ht	
		kW	mín	máx	nominal	mín	máx
Fuhrländer/Alemania	FL 600/50	600	3	20	10,8	50	75
Hewind/China	HW43 600 kW	600	3,5	25	14,5	38,5	48,5
Turbowinds/Bélgica	T600-48	600	3,5	25	12,5	50	60
Wind Technik Nord/Alemania	646	600	3	25	12	50	50
Wind Technik Nord/Alemania	648	600	3	25	12	65	65

**Tabla 6.4 Aerogeneradores y sus proveedores. Fuente: [www.thewindpower.net](http://www.thewindpower.net)**

No obstante, esto sólo es con fines comparativos y para futura referencia en etapas posteriores del proyecto, debido a que los expertos señalan que resulta conveniente proceder de manera cautelosa en la selección de este equipo, siendo pertinente emplear una sola turbina de tecnología ya probada y, en ese mismo sentido, es también recomendable seleccionar una torre de 40 metros sobre versiones más altas para ayudar a minimizar los costos iniciales de inversión (RetScreen International, 2010). Siendo así y para trabajar con base a experiencia existente, se ha propuesto un equipo de la misma capacidad que el que opera la CFE en Guerrero Negro, pre-seleccionando el modelo FL600/50 de la empresa alemana Fuhrländer, pues con él se estima una generación mínima de 1.209 GWh anuales, con una media de 1.300 GWh al año (Maya, 2007), además de que la velocidad mínima de viento que requiere para comenzar a operar es de las más bajas y que la altura mínima requerida por su rotor brinda la posibilidad de erigir una torre de alrededor de los 40 metros de altura, que se aproxima a la altura de las mediciones consideradas.

Con tales cifras podría satisfacerse en su totalidad la demanda de este proyecto y aun tener un excedente eléctrico de entre los 280 y los 370 MWh anuales para su venta.

# VII. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO

## 7.1 Introducción

En la última década ha habido un decremento significativo en los costos de capital y de operación. El costo del agua desalada suministrada al cliente, disminuyó de 2,0 US\$/m<sup>3</sup> en 1998 a 0,5 US\$/m<sup>3</sup> en 2004 (Wilf, 2010). Esta disminución es aún más destacable si se considera que, en promedio, los requerimientos de calidad del agua desalada son más estrictos en la actualidad de lo que lo eran en la última década del siglo pasado. Mientras que estudios más recientes para la península árabe calculan un costo del metro cúbico de agua desalada que puede oscilar entre los 0,45 y 0,43 dólares (Darwish & Al-Najem, 2009). Lo que ha motivado estas mejoras económicas son la competencia y las mejoras en los procesos y en la tecnología de las membranas. En general, los proyectos de desalación son asignados después de un muy competitivo proceso de licitación, mientras que la mayoría de los grandes sistemas de ósmosis inversa son construidos para proveer de agua a las poblaciones, usualmente bajo el modelo de acuerdo Build, Own and Operate (BOO) (Wilf, 2010).

No obstante, la parte medular de este capítulo se centra en determinar un estimado de los costos de operación de la planta desaladora por ósmosis inversa y, en específico, del recurrir a la energía del sistema eléctrico estatal para satisfacer su demanda, ya que lo que se desea es mostrar que la autogeneración resulta económicamente más viable, al poderse producir el total de la energía que la planta demandaría más un excedente para ser vendido.

## 7.2 Estimación de costos

La estimación de los costos se divide en cálculo de costos de capital o de construcción, y de costos fijos y variables de operación y mantenimiento. Dentro de los primeros se incluye a todos los asociados con la construcción de todo el complejo, por lo que, en ese sentido, todos los costos de capital regularmente son referidos como costos de inversión. En el desarrollo de este trabajo, dado su alcance, se consideraron únicamente los costos de construcción de los principales elementos del proyecto, en los que están el sistema de desalación de agua, el tanque de almacenamiento, la línea de tubería de permeado y la de concentrado, el edificio de proceso, el sistema de post-tratamiento y el aerogenerador.

En cuanto a costos de operación y mantenimiento, los costos fijos incluyen, únicamente, el costo del personal, mientras que los costos variables agrupan a los químicos de tratamiento y las membranas de reemplazo. El costo por consumo de energía eléctrica de la planta, de recurrirse al sistema eléctrico estatal, no se considera en ninguno de estos últimos costos para su mejor análisis posterior.

### 7.2.1 Consideraciones previas

La información de costos construcción y la de costos fijos y variables de operación y mantenimiento sobre las que este análisis se apoya está contenida en gráficas de costo-capacidad. La primera deriva de adquisiciones, cotizaciones de proveedores, experiencia y archivos personales de datos de costos. Por su parte, los costos de operación se derivan, de entre otras fuentes, de plantas actualmente en operación, y están suplementados por estimados de desempeño. Es muy importante comentar que dicha información solamente debe emplearse para comparar los esquemas de las alternativas para abastecimiento de agua a nivel de planeación, o para propósitos similares, mas no para negociaciones de procuración o para recaudar fondos para construcción. El nivel de exactitud que brinda dicha información es de aproximadamente  $\pm 30\%$  y toma como año base de los costos al de 2000, en dólares de los EE.UU. (Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior, 2003), siendo esta moneda la que será empleada en el resto de este trabajo, representada con el símbolo \$.

Es conveniente comentar, a modo ilustrativo, que para realizar la estimación de costos de un sistema de desalación se debe tener conocimiento de lo siguiente (Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior, 2003):

- Fuente de agua de alimentación y sus características.
- Capacidad de la planta.
- Criterio de diseño específico de acuerdo al sitio. Usado en el desarrollo del diseño técnico conceptual del complejo.



- Tamaño de la planta
- Requerimientos de calidad del agua
- etc.
- Criterio de costos: Establece los parámetros clave empleados para calcular los costos de capital y de operación.

La precisión de un estimado de costos es dependiente de la calidad de la información disponible, de la correcta aplicación de las técnicas, metodologías y herramientas de estimación, pero también de la experiencia del estimador. También depende, en una relación no lineal, de los recursos y el tiempo que se le otorguen, por lo que, si ambos factores le son asignados de manera razonable a su desarrollo, se garantizará una mejor precisión. No obstante lo anterior, no se puede pretender obtener un estimado de muy buena calidad cuando no hay información disponible, ya que esto repercutiría en una inadecuada línea de base de costos, siendo ésta indispensable para la posterior gestión y control de los costos del proyecto.

Así pues, no solo debido al alcance de este trabajo, sino también por la muy poca disponibilidad de información, incluso de una parte de la más básica, no se cuenta con los elementos necesarios para poder realizar un estimado de costos de esta propuesta muy preciso que sirva de base para su evaluación económico-financiera, y más aun, que permitiera sacar conclusiones definitivas e irrefutables sobre su viabilidad económica y financiera.

Es por esto que una estimación conceptual de costos es la que mejor se adapta a las características actuales de este trabajo, siendo suficiente para cumplir, con calidad, sus objetivos y su alcance, ya que en este capítulo se pretende mostrar la ventaja económica que representa la autogeneración eléctrica a partir del viento para alimentar la planta, frente al empleo de la energía eléctrica de la red estatal. Incluso se plantea la posibilidad de solventar los costos de operación y mantenimiento de la misma con los excedentes de electricidad generada que fueran vendidos a la CFE.

Una estimación conceptual de costos requiere para su desarrollo un mínimo de información, y se auxilia de datos históricos disponibles y de costos de últimos trabajos en proyectos o equipos similares. Dicha información puede estar disponible en diferentes medios, como gráficas de costo contra capacidad. El costo estimado determinado por este método es validado únicamente por la información de una planta similar, mientras que su precisión es altamente dependiente del alcance y el tiempo asignados para su preparación, pero ésta siempre oscilará entre el  $\pm 40\text{-}50\%$  del costo real, aproximadamente.

Los datos empleados como línea de base en la realización del estimado de este proyecto, como se mencionó anteriormente, son los mostrados en la tabla 7.1.

<b>Capacidad de la planta</b>	2.592 m <sup>3</sup> /día
<b>Fuente agua alimentación</b>	Acuífero-pozo
<b>Características agua alimentación</b>	
<b>Tipo</b>	Salobre
<b>TDS</b>	3.461,38 mg/L
<b>Energía específica desaladora</b>	0,8098 kWh/m <sup>3</sup>

Tabla 7.1 Línea de base de los datos para el estimado conceptual de costos, calculados en el capítulo VI

Vale recordar nuevamente, que en los costos de inversión del proyecto influye directamente la selección del aerogenerador, para lo cual se consideró la demanda energética máxima de la planta desaladora.

### 7.2.2 Costos de construcción

El costo de construcción de los principales componentes de la planta se determinó actualizando los costos que se obtienen de gráficas de costo contra capacidad a valores del año 2010 considerando la tasa de inflación media anual en México y un tipo de cambio peso-dólar de 12,63, valor promedio en tal año, presentándose a continuación en la tabla 7.2:

<b>CONCEPTO</b>	<b>\$ 2010</b>
Planta desaladora	\$ 2.876.854
Tanque Almacenamiento	\$ 283.804
Tubería permeado	\$ 295.019
Tubería concentrado	\$ 109.104
Edificio de Proceso	\$ 183.731
Sistema post-tratamiento	\$ 163.165
Aerogenerador 600 kW	\$ 1.020.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 4.931.677</b>

Tabla 7.2 Costo de construcción calculado de los principales componentes del proyecto

El costo del aerogenerador fue determinado con la información proporcionada en la Tabla 4.3 del capítulo IV, donde se especifica un costo de \$ 1.700 por kilowatt instalado.

### 7.2.3 Costos de operación y mantenimiento

Como se explicó en la introducción de este capítulo, el cálculo de los costos de operación y mantenimiento de la planta es importante, para conocer un aproximado de los pagos anuales que habrían de hacerse por estos conceptos y por emplearse la energía de la red eléctrica estatal, para con ello mostrar la conveniencia de recurrir a la autogeneración mediante un aerogenerador.

De igual manera a los costos de construcción de la planta desaladora y sus componentes principales fueron obtenidos estos costos, y se consideraron para realizar este análisis como se cita a continuación.

#### 7.2.3.1 Costos fijos

Éstos son los gastos en personal, mostrados en la tabla 7.3. De la misma manera al caso de la desaladora de Los Cabos, se propone un tipo de contrato *Build Own Operate (BOO)*, de modo que con ello se salve el tema de la necesidad de personal capacitado para la operación de la planta, que estaría conformado por 6 operarios, aproximadamente.

CONCEPTO	\$ 2010
Personal	\$ 26.750
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 26.750</b>

Tabla 7.3 Costos fijos calculados del proyecto

#### 7.2.3.2 Costos variables

Esta estimación condensa los gastos en químicos de tratamiento y las membranas de reemplazo, como se presentan en la tabla 7.4.

CONCEPTO	\$ 2010
Químicos	\$ 33.015
Membranas de reemplazo	\$ 19.486
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 52.501</b>

Tabla 7.4 Costos variables calculados del proyecto

### 7.2.3.3 Pago por electricidad

El pago anual por energía puede considerarse como parte de un preámbulo de análisis financiero, por lo cual, a continuación se presenta información sobre los costos operativos de la planta por concepto únicamente de la electricidad empleada en el proceso de desalación por ósmosis inversa, con lo que se pretende sustentar económicamente la necesidad e importancia que representa para la propuesta de este trabajo la autogeneración de energía eléctrica a partir del viento, cuyo potencial en la región resulta suficiente para los fines aquí perseguidos, en conjunto con el aerogenerador que fue pre-seleccionado, como se mostró en los capítulos precedentes, y como será mostrado desde el punto de vista económico.

Los principales valores empleados en el cálculo de los conceptos abordados en este apartado se muestran a continuación en la tabla 7.5, determinados previamente en el capítulo VI.

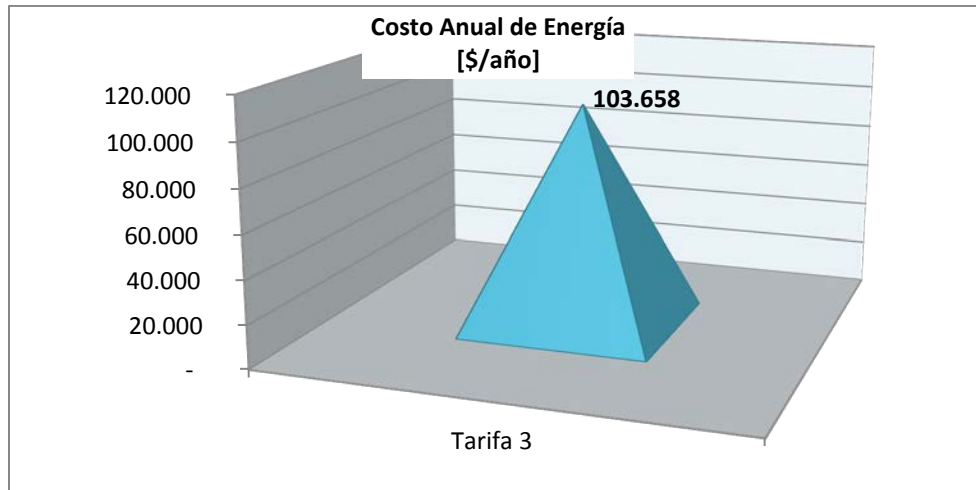
Demanda eléctrica de la planta desaladora	928	MWh <sub>año</sub>
Energía generada media anual	~1.209-1.300	MWh <sub>año</sub>
Excedente eléctrico medio anual	~280-370	MWh <sub>año</sub>
Precio de venta del excedente eléctrico	78,2 <sup>/1/</sup>	\$ <sub>2010</sub> /MWh

/1/ Estimado a partir del costo de producción en 2003 de una central de ciclo combinado de una refinería de PEMEX para cogeneración de vapor y electricidad, suponiendo una tasa de 4,47% de inflación promedio anual.

**Tabla 7.5 Datos supuestos adicionales considerados para el flujo de efectivo del proyecto**

Como puede apreciarse, del excedente eléctrico podrían percibirse ingresos, que serían de entre \$22.000 y \$29.000 anuales, suponiendo el precio de venta indicado en la tabla 7.5.

Sin embargo, el no recurrir a la autogeneración como forma de abastecimiento energético para el proyecto, lejos de representar ingresos económicos, por mínimos que fueran, implicaría pagos por la cantidad mostrada en la gráfica 7.1, que es el valor estimado del costo anual de la electricidad que demandaría la planta desaladora, considerando como referencia la “Tarifa 3” de la CFE para servicio en baja tensión para más de 25 kW de demanda. Se debe destacar que esta tarifa es actualizada mensualmente, generalmente tendiendo a sufrir incrementos.



**Gráfica 7.1 Costo anual calculado del consumo eléctrico de la desaladora**

Nuevamente se recalca que el dimensionamiento y pre-selección del aerogenerador fueron pensados para que el proyecto sea capaz de satisfacer su propia demanda energética, evitando así su dependencia del sistema eléctrico estatal y, por lo tanto, el pago de de los casi \$104.000 anuales calculados. Además, lograría ingresos por la venta del excedente eléctrico generado.

Sin duda, la realización de un análisis con un nivel de detalle más profundo, una vez que se dispusiera de más y mejor información, permitiría establecer las características exactas para el dimensionamiento del proyecto, con lo que se dé total certeza de su viabilidad económico-financiera, ya que, además, se estima que escalando la capacidad de generación de este proyecto y recurriendo a los apoyos internacionales por la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, podría dársele la rentabilidad suficiente para generar los ingresos que permitan cubrir el total de sus gastos, tanto de operación y mantenimiento como de deuda, y que aun se generen utilidades para su dueño.

### **7.3 Propuesta de financiamiento**

El proyecto aquí presentado es una propuesta para los gobiernos federal o estatal, por ser los gestores, a través de sus respectivas secretarías, de los recursos económicos y naturales de los cuales se vale el sector agrario, así como también los principales responsables de su desarrollo. Por lo cual, el dueño del proyecto podría ser algún organismo federal, ya fuese la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y

Alimentación (SAGARPA); o del gobierno estatal, la Secretaría de Fomento Agropecuario o la Comisión Estatal del Agua.

Referente a la forma en la que podrían obtenerse recursos económicos para financiar la totalidad del proyecto, se realizó una primera búsqueda de prestamistas, entre las diferentes organizaciones, tanto públicas como privadas, nacionales e internacionales, de fomento y desarrollo, y se ha concluido que la que podría resultar más conveniente para esta propuesta es el Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN), ya que su misión está enfocada a apoyar proyectos, públicos o privados, que remedien problemas ambientales o de salud humana en la región fronteriza entre México y los EE.UU. que comprende hasta 200 kilómetros hacia el sur del límite internacional, en suelo mexicano, que atiendan los sectores de suministro de agua potable y su conservación, y energías limpias, como la eólica, entre otros; otorgando, para ello, financiamientos hasta con 25 años para pago de deuda y tasas de interés preferenciales. Por consiguiente, para poder determinar el monto del préstamo y someter la propuesta a consideración de dicha institución, será menester proporcionar, a su debido tiempo en las etapas posteriores del proyecto, un mayor nivel de precisión en cuanto a su estimado de costos.

Por último, un esquema de financiamiento que valdría la pena tomar en consideración es el mismo, o uno similar, al empleado para la construcción de la planta desaladora de Los Cabos, Baja California Sur, en cuyo caso el gobierno federal hizo una aportación del 30% a fondo perdido del costo total de inversión, mientras que el capital restante fue integrado por un préstamo privado de inversionistas y otra parte aportado como capital de riesgo por la empresa constructora y dueña del proyecto, quien se encarga de toda la gestión de la planta (Organismo Operador Municipal del Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Los Cabos, 2010).

#### **7.4 Perspectiva social y ambiental de los costos de inversión y energéticos del proyecto**

Hay que hacer hincapié en que este tema se debe abordar desde una perspectiva diferente, ya que el carácter social y económico de los problemas que se pretenden resolver lo hacen de capital importancia, debido a que el sector agrícola y, en general, la población del valle de San Quintín, requieren de una solución real que ponga fin a su problema de poca disponibilidad de agua de buena calidad para riego agrícola; por lo que la relación costo-beneficio de esta propuesta debería ser cuantificada y juzgada, principalmente, desde un punto de vista social, esto es, la generación de valor que le representaría.

Varios de los principales problemas de carácter social, económico y ambiental que afectan al territorio, citados en el capítulo III, están relacionados, directa o indirectamente, con el agua, por su característica escasez en el noroeste de México. Ante tal situación, independientemente de que deban de realizarse acciones para promover y garantizar su uso eficiente y cuidado, la desalación

es la alternativa más viable para proveer de una fuente adicional de agua para riego agrícola. Para este fin, la ósmosis inversa es la tecnología más conveniente por ser la que más se ha desarrollado en los últimos años, razón por la cual ha crecido su uso a nivel mundial por encima de las demás, incrementándose aun más sus ventajas y disminuyendo su impacto al medio ambiente cuando se emplea para tratar agua salobre. Y, como se mostró en el capítulo IV, la operación de este proceso requiere de un suministro eléctrico confiable y que implicaría costos anuales de consideración por este concepto, de recurrirse al sistema eléctrico estatal, por un monto que se estima en \$104.000, para desalar el volumen de agua salobre propuesto. Dicha erogación podría ser evitada pues, otra ventaja de esta tecnología es que es la única que puede operar en su totalidad a partir del gran potencial eólico característico de la región, por lo que su funcionamiento realmente sería libre de emisiones de gases de efecto invernadero de emplearse la autogeneración, ya que el sistema eléctrico estatal suministra a San Quintín desde la subestación y central turbogas Ciprés, que consume gas natural, por lo que los beneficios de este proyecto serían ya no únicamente locales, sino regionales, al evitarle dicha contaminación a la localidad de Ciprés.

Ante tal panorama, puede ponerse en duda si el alimentar la planta a partir del sistema eléctrico estatal, considerando también los subsidios que paga el gobierno al sector eléctrico, conducirían hacia un futuro prometedor para mejorar el bienestar social, económico y ambiental tanto de San Quintín como incluso de la localidad de Ciprés, así como para las finanzas públicas, o si el destinar recursos para el financiamiento de este proyecto, representa en el mediano y largo plazo una mejor inversión económica, siendo verdaderamente rentable desde el punto de vista de desarrollo económico-social y ambientalmente sustentable para ambas localidades involucradas.

Desde la perspectiva gubernamental, tanto federal como local, esta propuesta representa una oportunidad para redirigir los esfuerzos destinados a mejorar la productividad del campo y, por tanto, las condiciones de vida de los agricultores, pues durante años se ha buscado que esto así sea mediante el otorgamiento de apoyos consistentes en subsidios a la electricidad empleada para el bombeo del agua para riego agrícola, o para la compra de diesel, por citar algunos. Tales acciones resultan cuestionables desde el momento en el que se observa que la situación social y económica del campo no ha mejorado y se ha mantenido así ya por demasiados años, por lo que puede concluirse que de dicha manera no se solucionarán realmente y de raíz ninguno de los problemas que aquejan al sector y, por si fuera poco, no representan siquiera un factor que promueva el desarrollo sustentable, porque no buscan hacer más eficiente y preservar el uso de los recursos; por lo que se hace evidente que si dicho dinero se invirtiera en mecanismos que verdaderamente coadyuvaran al progreso del sector, podrían tenerse, con toda certeza, por bien invertidos. Pues, de acuerdo a los cálculos realizados para este trabajo, presentados en el capítulo III, anualmente son requeridos en el valle de San Quintín aproximadamente 85 millones de metros cúbicos de agua para regar alrededor de 8.010 hectáreas, que es la mitad del total de su superficie de riego, de los cuales, esta propuesta estaría satisfaciendo el 11% de ese volumen anual de agua, por lo que al considerar dicho porcentaje que se cubriría, se puede comprender que la inversión que requiere resultaría no tan considerable en comparación con la razonable proporción del agua

necesaria que sería aportada, pudiéndose, por lo tanto, justificar y tenerse por una inversión muy conveniente y rentable.

Otros ingresos que hasta el momento no han sido considerados y que seguramente mejorarían y probablemente definirían la rentabilidad financiera son los referidos a las reducciones certificadas de emisiones. Existen diversas herramientas disponibles actualmente en internet, que pueden ser útiles para los promotores y evaluadores de proyectos interesados en la evaluación de los aspectos ambientales y financieros de proyectos de energía renovable. Estas herramientas permiten el cálculo de una línea base que será utilizada para estimar la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero que resultaría de un proyecto específico y el impacto económico-financiero en el mismo (RetScreen International, 2010).

#### **7.4.1 Análisis de la repercusión social**

A pesar de que los proyectos de desalación de agua a grandes escalas tienen más de 50 años de historia, el conocimiento actual de los impactos ambientales, socio-económicos y en salud humana, que traen consigo, podría ser ampliado. Las consideraciones socio-económicas y culturales incluyen los efectos del proyecto en el día a día de la vida de las personas y de la comunidad, así como su impacto en el manejo de los recursos naturales y en el desarrollo local y regional (World Health Organization, 2007).

Como ya se ha mencionado, la economía del valle de San Quintín depende fuertemente de la agricultura, al grado de ser su principal actividad económica, por lo que resulta imprescindible protegerla, fortaleciéndola para elevar sus niveles de productividad y para hacerla una actividad económica verdaderamente rentable y siga siendo atractiva para los que de ella dependen o los que están en la búsqueda de una fuente de empleo, con lo que se evite el abandono del campo por la migración hacia otras actividades económicas o, incluso, a otras localidades, pues el desempleo ocasiona aumento del nivel de pobreza y de marginación, incrementándose la inseguridad y la violencia. Esta actividad le ha dado a la región un crecimiento económico particular, caracterizándola y haciéndola atractiva frente a otras regiones de la geografía nacional, hecho que se hace evidente durante la época de cosecha, en la que arriba mano de obra de otros estados del país, sobre todo de algunos con los mayores índices de pobreza y desempleo. Por ello, se debe asegurar la disponibilidad e incrementar la calidad de los instrumentos necesarios para que esta condición mejore, con lo que se pueda garantizar estabilidad y seguridad laboral a los jornaleros, quitándoles la necesidad de emigrar constantemente en la búsqueda de mejores oportunidades, ya que la agricultura es una actividad económica que implica mucho riesgo para sus trabajadores, al ser totalmente dependiente de las condiciones climatológicas o estacionales, así como de la disponibilidad y calidad del agua.

Algunas acciones que buscan favorecer la productividad del campo son, por ejemplo, el empleo de malla-sobra e invernaderos, que permiten proteger a los cultivos de las condiciones climatológicas y con ello reducir considerablemente la dependencia a esta variable. La capacitación continua es



también un medio importante de apoyo, pues permite informar y enseñar temas importantes relacionados con el agua, como su abastecimiento, uso y cuidado; o relacionados con los cultivos, como su selección apropiada de acuerdo a sus características particulares y a las del lugar a sembrar, como necesidades hídricas, tolerancia a la salinidad, etcétera.

Es de gran prioridad, por lo tanto, para garantizar un futuro no sólo prometedor, sino digno, al sector y a la región, el contar con un agua cuya disponibilidad y calidad no esté condicionada, sino que sea adecuada y constante, pues al contar con una fuente o suministro de agua confiable se estará asegurando y garantizando, asimismo, una fuente de empleo en la región, que permita a sus beneficiarios dedicar todo su esfuerzo en el desempeño de sus actividades laborales diarias, dando como resultado una mejor calidad de vida para ellos y sus familias, al poder garantizar alimentación, salud y educación para los suyos, con lo que se favorecería el desarrollo general y el crecimiento económico y social estatal.

#### **7.4.2 Repercusión ambiental**

La puesta en servicio de la planta desaladora coadyuvaría a mitigar el deterioro del ecosistema, al evitar el seguir contaminando grandes extensiones de terreno por la salación producida por emplear agua salobre para su riego, con lo que se frenaría, a su vez, su erosión y el tener que abrir nuevas extensiones de tierra para cultivo. Consecuentemente, se disminuiría el volumen de agua extraído del acuífero San Quintín, al no requerirse extraer volúmenes adicionales para el lavado de la tierra, práctica hecha cuando se tiene agua para riego, o suelo, con altos niveles de salinidad.

En otro aspecto, en el norte de la península de San Quintín se localiza la Laguna Figueroa, que es una laguna híper-salada. Ésta es separada del océano por una cadena de dunas costeras que se extienden al sur del Volcán Sudoeste que filtran el agua de mar y forman bancos de sal de su lado este, que son usadas para producción de sal. También existen otras lagunas al sur de Laguna Figueroa, destacando el Estanque La Pinta, y todas están consideradas en una categoría de conservación, debido a que son el hábitat de varias especies catalogadas, tanto en México como en EE.UU., como amenazadas o en peligro de extinción. Actualmente, la Laguna Figueroa no se encuentra amenazada por actividades de desarrollo o recreativas, sin embargo, aun no ha sido monitoreado el impacto que en ella tiene la minería de sal y la recolección de piedras de playa (Conservation Biology Institute & The Nature Conservancy, 2007).

Es con base a este último panorama, que se expone como un beneficio ambiental adicional del proyecto propuesto, la producción de sal a partir del flujo de concentrado, o salmuera, de la planta desaladora, empleando estanques de evaporación, con lo que, de esta manera, los residuos de la planta, prácticamente serían inexistentes y, al mismo tiempo, se estaría generando una fuente adicional estable de empleo. En caso contrario, la salmuera puede ser desechada en el mar, sin ningún impacto al ecosistema, pues su contenido de TDS, en caso extremo, sería no superior a los 20.000 mg/L, valor muy inferior a la media del agua de mar, que es aproximadamente de

35.000 mg/L o mayor, y mediante el empleo de difusores sus posibles efectos serían mucho menos perceptibles.

Por su parte, se estima que la puesta en operación del aerogenerador permitiría liberar a la atmósfera, y en específico a la localidad de Ciprés, de la emisión de aproximadamente 650 toneladas de gases de efecto invernadero anuales, al ser éste el encargado de producir la electricidad que empleara la planta desaladora y un excedente para venta, el cual a su vez podría ser utilizado por un usuario de algún otro sector, en lugar de usar electricidad proveniente de fuente fósil. Lo anterior se determinó suponiendo que cada MWh que se produce implica la liberación de 0,5 toneladas de bióxido de carbono (RetScreen International, 2010).

## 7.5 Conclusiones

Para la evaluación económica de un proyecto existen diferentes métodos de estimación de costos, como el estimado conceptual, empleado en este trabajo, que permite calcular el costo total de inversión de un proyecto determinando los costos de construcción de una planta, pero también los costos fijos y variables de operación y mantenimiento, a partir de gráficas de costos históricos contra capacidad. De esta manera se determinó un costo aproximado de inversión del proyecto tomando en cuenta únicamente los costos de construcción de los elementos del mismo considerados como componentes principales, a partir de estimaciones hechas para cada uno de ellos, y que son la planta desaladora, en su conjunto; el tanque de almacenamiento, las tuberías de permealto y de concentrado, el edificio de proceso, el sistema de post-tratamiento, y el aerogenerador; tomándose como costo de construcción para este último, el costo de inversión por kilowatt instalado reportado en la literatura por el gobierno federal. Fue de esta manera que se estimó un costo de inversión en tales componentes de poco más de \$ 4.900.000, al tiempo en que con todos los datos calculados, y auxiliándose en información diversa disponible de varios proyectos similares, se estima que el estimado de costos presentado podría tener un nivel de precisión del  $\pm 45\%$ .

Por su parte, respecto a la operación y el mantenimiento de la planta, en los costos fijos se consideró solamente al personal y a las membranas de reemplazo, demandando un gasto anual aproximado de poco más de \$ 46.000; mientras que en los costos variables sólo se consideraron los químicos de tratamiento, que implicarían pagos anuales de alrededor de \$ 33.000.

Con ello, a modo de preámbulo de análisis financiero se presentó la información relacionada con los costos energéticos de la planta desaladora si se alimentara esta a partir de la electricidad del sistema eléctrico estatal, para lo cual se le estaría facturando el servicio bajo la "Tarifa 3" de la CFE, lo cual resultaría en un gasto anual de aproximadamente \$104.000, erogación que muy probablemente podría evitarse recurriendo a la autogeneración mediante la propuesta hecha de

instalar un aerogenerador de 600 kW, que sería capaz de cubrir la demanda energética total de la planta y producir, adicionalmente, una cantidad extra de energía para ser vendida a dicha paraestatal, representando ingresos que oscilarían entre \$ 22.000 y \$ 29.000 anuales, que, si el dueño del proyecto fuera algún organismo gubernamental federal, ya fuese la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA); o del gobierno estatal, la Secretaría de Fomento Agropecuario o la Comisión Estatal del Agua, principales gestores de los recursos de los que se vale el sector agrario, las cantidades anteriores se convertirían en capital disponible para destinar a cubrir otras necesidades u otros fines que coadyuven al progreso del país, invirtiendo de una mejor manera los recursos públicos en proyectos que en el mediano y largo plazo resultarían en beneficios sociales, económicos y ambientales. O tales cantidades representarían una forma de recuperar, aunque mínima, una pequeña parte del capital invertido en el proyecto.

Por lo anterior, puede verse que los beneficios que se conseguirían mediante esta propuesta en todos los ámbitos implicados, es decir, la capacidad de generación de valor de este proyecto, sería enorme, siendo ésta, en realidad el parámetro más importante de todos mediante el cual debería ser medida su rentabilidad y viabilidad, sin dejar de lado, en adición a lo anterior, la sustentabilidad que representa, características todas ellas que le conferirían la posibilidad de ser financiada por el Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN), de acuerdo a un primer análisis realizado de las posibles fuentes de financiamiento; y, adicionalmente, le facilitarían el acceso a los diversos tipos de apoyo existentes a nivel internacional, que buscan incentivar la inversión en el desarrollo de proyectos verdes u orientados a abatir problemas sociales, como bonos de carbono, al evitar la emisión varias toneladas anuales de gases de efecto invernadero.

Así pues, los aportes de dicha inversión representarían enormes beneficios en los temas social y ambiental pero, también, en el ámbito económico de una población como muchas otras que existen no sólo en México sino en todo el mundo, con problemas semejantes, pues el agua es uno de los temas de mayor interés y que causará más preocupación en el presente siglo.

## VIII. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El problema de escasez de agua para uso consuntivo del ser humano cada día es mayor, consecuencia, por una parte, de las características propias a la ubicación geográfica de una localidad en específico, pero también al incesante incremento poblacional, que acrecienta su uso desmedido, desperdicio y contaminación; tal es el caso de la zona estudiada en este trabajo, en la que el mayor volumen de agua que consume la población es extraído del acuífero San Quintín, el cual presenta problemas de mala calidad de sus aguas desde 1970, por lo menos, al contaminarse por la intrusión de agua de mar, ocasionada por la sobre-explotación a la que está sujeto, motivo por el cual el nivel de salinidad de sus aguas la convierten en salobre, con un contenido promedio de TDS de aproximadamente 3.400 mg/L, pero que aun así es empleada para riego agrícola, intensificándose la sobre-explotación del acuífero, pues debe extraerse un mayor volumen de agua para el lavado de la tierra, que permita disminuir el nivel de sal en ella presente, aunque de cualquier manera resulta contaminada por salación, corriéndose además el riesgo de erosionarla, de mantenerse tal práctica.

Ante la falta de fuentes de agua alternas, el desarrollo, mejora continua y empleo de procesos de desalación es, desde hace algunas décadas, práctica común en regiones en las que escasea el recurso y que, generalmente, tienen cerca el mar o alguna otra fuente de agua salobre o salada. De todos los procesos, la ósmosis inversa es el que se ha desarrollado más ampliamente en los últimos años, lo que le permite, en la mayoría de los casos, ser el mejor proceso de desalación de agua de todos, tanto de mar como salobre, en pequeño o gran volumen, con un costo por metro cúbico de agua desalada, si no el menor, sí de los más contenidos, con la ventaja de que no emplea directamente combustible fósil alguno para su funcionamiento, permitiéndole ser empleada en lugares donde hay carencia de fuentes de éste, tanto naturales como hechas por el hombre. Por otro lado, se encontró que la desalación de agua salobre por ósmosis inversa resulta ser la mejor alternativa de obtener agua potable de la manera más eficiente y económicamente posible, con el menor impacto ambiental, pues representa los menores costos de inversión y fijos y variables de operación y mantenimiento respecto a la desalación de agua de mar con esta misma tecnología.

Del análisis de los recursos energéticos realizado en el capítulo IV, se sabe que por no contarse en el valle de San Quintín con fuentes naturales de energéticos convencionales, el empleo de combustibles fósiles resulta en costos demasiado elevados por los gastos adicionales que habrían de hacerse para su abastecimiento y distribución, pues la zona de estudio es abastecida de tales combustibles por medio de auto-tanques, que es el medio más costoso al comparársele en capacidad, e incluso seguridad, contra el ducto, el buque-tanque o el carro-tanque; siendo, además, que en sitio no se tiene ni la infraestructura ni la demanda suficiente para el abastecimiento de grandes volúmenes de estos combustibles.

Para afirmar lo anterior, el análisis de las fuentes de energía potenciales fue conducido de modo que se trataron de manera independiente los energéticos no convencionales de los convencionales, con lo que se pretendió tener igualdad de contextos y, a su vez, cada fuente de energía fue analizada de manera cualitativa y cuantitativa.

Aunque la electricidad es comúnmente considerada como una “energía limpia”, su producción es mayoritariamente realizada con la quema de algún combustible, lo que implica generación y liberación de gases de efecto invernadero que contribuyen a deteriorar el medio ambiente y la calidad de vida de todo ser vivo, por su fuerte relación con el calentamiento global. Con ello, el empleo de este tipo de energía viene a ser, finalmente, igual de perjudicial que los combustibles, a menos que sea generada a partir de energías renovables como la solar, geotérmica o eólica, entre otras; estando presentes de manera abundante estas tres en Baja California, y solamente la solar y eólica se tienen en el valle de San Quintín. Por lo que, para determinar cuál habría de emplearse en la generación de la energía que habría de consumir la desaladora, se realizaron análisis cualitativo, cuantitativo y FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas), mediante todos los cuales se concluyó que la solar no puede ser empleada en esta propuesta, ya que las tecnologías para su aprovechamiento son las más costosas, las de menor eficiencia y las que requieren mayor superficie para su instalación, de las tres citadas. Por su parte, no existe manifestación geotérmica alguna en el sitio estudiado ni en los circunvecinos, esto sin considerar que para la explotación de este recurso se requiere de fuertes costos de inversión por concepto de exploración, perforación de pozos y equipo, descartando, con esto, su empleo. En contraste, la energía eólica implica costos de inversión moderados y una eficiencia bastante competitiva con las energías convencionales en contextos geográficos favorables, como lo es la zona de estudio, lo que la hace la más apropiada y ser la opción que se propone emplear.

Se analizó la situación actual de la zona de estudio y, de la información de su sector agrícola, en la que se incluye las superficies de temporal y de riego, y de ésta última, el promedio cultivado anualmente, junto con la superficie anual sembrada de cada uno de los cultivos de riego y los de mayor importancia para la zona, por su superficie sembrada o importancia económica en conjunto con su respectivo calendario de riego; por último, el volumen anual total de agua empleado en riego agrícola, fue que se determinó diseñar una planta desaladora para satisfacer el 11% de la demanda total de agua para riego agrícola, que equivale a casi 2.600 metros cúbicos diarios de agua. En el cumplimiento de este objetivo se propuso como equipo principal de la planta al

sistema de membranas de ósmosis inversa, al ser la parte medular del proceso y de la cual depende el diseño del resto de sus sistemas.

Durante la realización de tal tarea, se comprobó, utilizando un simulador del proceso de ósmosis inversa, que el diseño del sistema de membranas es totalmente dependiente de la calidad del agua de alimentación, de la velocidad de flujo de permeado a través de la membrana y de la temperatura; pero es el flujo de permeado el parámetro más importante en el diseño, por ser el más condicionante para su dimensionamiento, su consumo energético y la calidad de su producto, mientras que el tipo de elemento de membrana empleado, de entre los dos analizados en el capítulo VI, no influyó considerablemente en los valores de salida del sistema.

Con base en tales observaciones pudieron fijarse los valores de diseño del proceso de ósmosis inversa para su dimensionamiento y con ello conocer los principales valores de salida. De éstos últimos, entre los más importantes está la calidad del permeado, pero, sobre todo, la demanda de energía, para poder entonces, junto con la demanda eléctrica estimada del equipo auxiliar y las pérdidas durante su transmisión, estimadas en 15%, especificar el aerogenerador apropiado que provea la energía eléctrica total que el proyecto habría de requerir y el excedente que sería vendido a la CFE.

El dimensionamiento del aerogenerador también supuso que el potencial eólico de la zona de estudio es el mismo que el que se presenta en Guerrero Negro, localidad de la costa del Pacífico de Baja California Sur, debido a que no se tiene información propia del valle de San Quintín que trate sobre dicho tema. Con lo cual, se asumió que el factor de planta medio anual es de 23%, se tendrían las velocidades de viento promedio y nominal de 7,7 y 11 m/s, respectivamente, a 40,5 metros de altura, lo que la haría apta para generación eléctrica, pues podría proveer el total de la electricidad requerida.

La propuesta de aerogenerador fue hecha con el apoyo de información de una base de datos de estos equipos en internet, que dispone de sus especificaciones técnicas para la mayoría de los fabricantes, buscando que sus valores de operación se ajusten a las condiciones anteriormente señaladas. De este modo, se seleccionó un aerogenerador de 600 kW del fabricante alemán Fuhrländer, cuya velocidad de viento nominal es de 10,8 m/s, pero con una mínima de 3 m/s, además de que tiene la posibilidad de especificar la altura final de su torre. Por otro lado, este equipo fue analizado empleando una herramienta computacional para la evaluación de los aspectos ambientales y financieros de proyectos de energías renovables a partir de cierta información técnica, con lo que se observó su desempeño bajo ciertas condiciones dadas.

El dimensionamiento del sistema de ósmosis inversa y del aerogenerador es fundamental para realizar el análisis económico del proyecto, pues dicho análisis está fundamentado en un estimado conceptual de costos, que es un método para obtener una aproximación a todos los costos de un proyecto en las etapas tempranas de ingeniería o cuando se carece de información técnica detallada, pero que sí debe contar con información básica. Está basado en gráficas de costo contra capacidad para los principales componentes de costo de una planta desaladora de agua salobre por ósmosis inversa y tiene un margen de precisión de entre el  $\pm 40-50\%$  del costo real,

aproximadamente. En el caso de este trabajo, solamente se consideró a la planta desaladora, al tanque de almacenamiento, las tuberías de permeado y concentrado, el edificio de proceso, el sistema de post-tratamiento y al aerogenerador como elementos principales para el análisis económico. Respecto al costo de inversión del aerogenerador, se empleó el valor de costo de inversión por kilowatt-hora instalado, determinado por el gobierno federal. También fueron estimados de esta manera los costos anuales fijos y variables de operación y mantenimiento.

Es así que finalmente se calculó un monto de inversión para esta propuesta de aproximadamente 4,9 millones de dólares, cifra que engloba el costo de construcción de los elementos citados en el párrafo anterior, incluido el aerogenerador; mientras que los costos anuales de operación y mantenimiento fijos y variables representan una cantidad de \$ 79.000. Estas estimaciones tienen un rango de aproximación de 45%, al cotejarlas con información de proyectos semejantes anteriores.

También se estimó en alrededor de \$ 104.000, los costos anuales que implicaría el pago de la energía eléctrica consumida por la planta y comprada a CFE a través del sistema eléctrico estatal, con lo que se hace evidente la conveniencia de recurrir a la autogeneración a partir del potencial eólico citado para satisfacer dicha demanda y obtener un excedente que pueda ser vendido a la paraestatal, lo que podría generar ingresos anuales que se estiman entre \$ 22.000 y \$ 29.000. Dichos ingresos podrían destinarse a la amortización de la operación y el mantenimiento de la planta, mientras que los ahorros logrados mediante la autogeneración le darían al dueño del proyecto la oportunidad de destinar dicho capital a otros propósitos. En adición a lo anterior, la generación eólica haría al proyecto propuesto ambientalmente sustentable, desde el momento en que se estima que con su puesta en marcha se dejarían de emitir alrededor de 650 toneladas de gases de efecto invernadero anualmente, por la quema de gas natural que habría de hacerse en la central generadora turbogas de la localidad de Ciprés, que abastece a San Quintín, para la generación de la energía necesaria para la planta. Esto prácticamente le garantizaría el acceso tanto a los recursos financieros internacionales existentes que buscan promover la inversión en proyectos verdes, como bonos de carbono por reducciones certificadas de emisiones de gases de efecto invernadero que, a su vez, impactaría favorablemente en la evaluación financiera del proyecto; como, igualmente, a las instituciones interesadas en el financiamiento de tales proyectos o aquellos que atacan problemas sociales. Esto último se desprendió de la búsqueda y análisis de las posibles fuentes de financiamiento, a partir de la cual se decidió proponer al Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN) como prestamista, por estar orientada su misión a financiar proyectos de esta índole, ubicados hasta 200 kilómetros al sur de la frontera internacional entre México y los EE.UU., cobrando tasas de interés preferenciales a plazos de hasta 25 años. Para esto, se propone un esquema de financiamiento similar al empleado en la construcción de la planta desaladora de agua de mar de Los Cabos, Baja California Sur, que da servicio a dos colonias de dicho municipio, con una capacidad de producción de más de 17 mil metros cúbicos diarios de agua desalada, y en la cual el gobierno federal hizo una aportación a fondo perdido del 30% del costo total de inversión, otra parte fue financiada por capital privado y una última parte se integró por capital de riesgo (Organismo Operador Municipal del Sistema de

Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Los Cabos, 2010). En este sentido, al ser un proyecto que busca atender un problema social específico, este trabajo va dirigido principalmente a las autoridades gubernamentales, y se esperaría que alguno de los niveles de gobierno fuera el dueño del proyecto, mediante alguno de sus organismos, como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA); la Comisión Estatal del Agua, o la Secretaría de Fomento Agropecuario de Baja California.

Es precisamente el gobierno quien debe entrever que todos los problemas adicionales que se generarán en los próximos años le requerirán gastos monetarios demasiado elevados de no contarse con soluciones e infraestructura que mitiguen o abatan los problemas actuales de la sociedad, entre los que destacan todos los referentes al agua. Bajo este enfoque, la relación costo-beneficio de este proyecto se habría de medir indirectamente, al confrontar los costos que implica, aunque, sobre todo, el valor que generaría por coadyuvar al bienestar económico, social y ambiental de una población, contra los gastos que implicaría su ausencia. De ahí que se pueda decir que este proyecto podría resultar ser rentable y una buena alternativa de solución a los problemas que aquejan al valle de San Quintín.

Para finalizar, debe mencionarse que muchos de los parámetros del análisis económico del proyecto son fuertemente dependientes de variables sobre las cuales no existe información propia, pero para este trabajo, que conforma la etapa conceptual del proyecto, resulta suficiente haber recurrido, en algunos casos, a estimaciones de éstos y también, incluso, el haber hecho ciertas suposiciones, auxiliándose de la información desarrollada como lo es, por ejemplo, el estimado de costos conceptual. De modo que los resultados obtenidos seguramente sufrirán oscilaciones significativas en su valor en las etapas posteriores de ingeniería, pues en ellas la precisión demandada debe ser mucho mayor, para lo cual resulta forzoso disponer de información confiable y precisa, en contraste con lo requerido en un estimado conceptual de costos y cuyo nivel de precisión obtenido, del 45%, quedó dentro del rango establecido en los objetivos de este documento, lo cual muestra la importancia que tiene la cantidad y calidad de la información.



# IX. APÉNDICES

# A: Láminas de Riego

Láminas de riego y volúmenes de agua demandados, en un ciclo agrícola, de cada cultivo sembrado en el valle de San Quintín, Ensenada y en Río Colorado, Mexicali. Datos obtenidos instancias gubernamentales, federales, estatales y locales.

**Tabla A.1 Tipos de cultivos y láminas de riego de cultivos sembrados en San Quintín, Ensenada, Baja California**  
Fuente: Secretaría de Fomento Agropecuario, Gobierno del Estado de Baja California, 2010

<b>Cultivo</b>	<b>Cantidad de lámina [m]</b>
Hortalizas	0,75
Forrajes	1,35

Requerimientos de agua por tipo de cultivo sembrado en el Distrito de Riego 014-Río Colorado, Mexicali, según información proporcionada por la Secretaría de Fomento Agropecuario de Baja California (SEFOA).

**Tabla A.2 Láminas de riego de cultivos sembrados en Río Colorado, Mexicali, Baja California**  
Fuente: Secretaría de Fomento Agropecuario, Gobierno del Estado de Baja California, 2010

<b>Cultivo</b>	<b>Cantidad de lámina [m]</b>
Trigo	1,15
Algodón	1,60
Alfalfa	1,80
Forrajes	1,40
Frutales	1,70
Hortalizas	0,95

Como puede observarse, los valores de láminas de riego de determinados cultivos no pudieron conocerse, por lo que, en tales casos, se tomaron valores genéricos de los que, a su vez, se derivaron otros promediando y ajustando a los de origen. El proceder de esta manera muestra una desviación de casi 31%, posiblemente debida precisamente al empleo de tales datos, que no consideran las condiciones meteorológicas ni topográficas locales, pero también puede ser debido a la baja eficiencia de la infraestructura hidráulica de los agricultores, que, de manera general, tiene un valor de 85%, con tendencia a la baja debido su desgaste natural (Secretaría de Fomento Agropecuario del Estado de Baja California, 2010).

Así pues, la superficie total de riego del estado es de 16.062 hectáreas (37,3% del total del valle), de las cuales en el año 2009 se sembraron únicamente 7.649 hectáreas, que equivalen al 47.62% del total de riego.

# B: Dimensionamiento Sistema de Membranas

El presente procedimiento empleado está a libre disposición en el portal de internet del proveedor de las membranas analizadas en este trabajo (Dow Chemical Company, 2010). Aquí se presenta el dimensionamiento del sistema de membranas de ósmosis inversa de este trabajo, con base en tal método, así como en los datos disponibles especificados en el apartado 6.3.3.1.1 del capítulo VI.

- Suministro de agua salobre de pozo para alimentación, SDI < 3 y 3.461,38 ppm.
  - Flujo de permeado total requerido = 2.592 m<sup>3</sup>/d.
  - Se emplearán recipientes a presión de 6 elementos de 8 pulgadas de diámetro, con flujo “plug”.
1. A partir de la información en tablas proporcionada por el fabricante como recomendación para realizar el diseño del sistema de membranas, se especifica que, cuando la fuente de agua de alimentación es un pozo y se van a emplear elementos de membrana de 8 pulgadas de diámetro y 40 pulgadas de largo, el flujo promedio del sistema oscila entre los 27 a los 34 L/m<sup>2</sup>h, pero resulta conveniente tomar un valor conservador, por lo cual se considerarán 27 L/m<sup>2</sup>h. Por otra parte, la recuperación máxima de dicho elemento es de 19%.

El proveedor de membranas elegido maneja componentes de estos de muy bajo consumo energético, para ahorros en los costos de operación, o elementos de alto rechazo de sales para una alta pureza del permeado. Son identificados con la nomenclatura propia del fabricante, y están subclasificados en membranas para agua de mar, para agua salobre y para agua de grifo. Para el tamaño de elementos elegido se pueden emplear, siempre que el nivel de TDS del agua de alimentación es menor a 5.000 ppm, ya sean membranas para agua de grifo, con un flujo mínimo del permeado del sistema de 10 galones por minuto (gpm), o los tipos para agua salobre o FR cuyas calidades de permeado son menores a 50 ppm y un flujo mínimo del permeado de 10 gpm o, para alimentación con TDS entre 3.000 y 15.000 ppm, la SW con calidad de permeado menor a 150 ppm, también con un flujo mínimo del permeado del sistema de 10 gpm.

En este caso, se decidió emplear una membrana tipo XLE que permite un consumo extra bajo de energía, pero proporcionando aun así una calidad de permeado adecuada para el fin requerido.

Tipo de Membrana	TDS de alimentación [ppm]	Flujo de permeado del sistema [gpm]	Calidad del permeado [ppm]
TW	<5.000	Elemento de 4 pulg.: máx. 25 Elemento de 8 pulg.: mín. 10	<50
BW, FR	<5.000	Elemento de 4 pulg.: máx. 25 Elemento de 8 pulg.: mín. 10	<50
SW	3.000 – 15.000	Elemento de 4 pulg.: máx. 25 Elemento de 8 pulg.: mín. 10	<150

Fuente: Dow Chemical Company, 2010

La velocidad máxima del flujo de permeado para elementos de membrana con área de superficie activa de 440 ft<sup>2</sup> es de 38 m<sup>3</sup>/d. Mientras, el flujo mínimo de concentrado para elementos BW de 440 ft<sup>2</sup> es de 3,0 m<sup>3</sup>/h.

- El flujo máximo de alimentación para elementos BW de 440 ft<sup>2</sup> de superficie activa (40,9 m<sup>2</sup>) es de 17 m<sup>3</sup>/h. Muy importante mencionar que la caída de presión máxima recomendada a lo largo de un elemento es de 15 psid (1 bar) o 50 psid (3,5 bar) a lo largo de múltiples elementos en un recipiente a presión, tomando el valor que resulte más limitante. Se recomienda diseñar con un máximo de 80% (12 psid) para cualquier elemento del sistema.
- Por lo que para el gasto diario necesario de 2.592 m<sup>3</sup>/d de permeado, selecciono elementos de 440 ft<sup>2</sup> de superficie, que me brindan un gasto máximo de 38 m<sup>3</sup>/d de permeado cada uno, por lo que, el número total de elementos necesario es

Número total de elementos requeridos = (velocidad de diseño del flujo de permeado) / (flujo de diseño) / (área activa de la superficie del elemento de membrana seleccionado)

Por lo que se tiene: (2.592 m<sup>3</sup>/d) / (27 L/m<sup>2</sup>/h) / (40,9 m<sup>2</sup>)  
(2.592 m<sup>3</sup>/d) (1 d/24 h) / (27 L/m<sup>2</sup>/h) / (1 m<sup>3</sup>/1.000 L) / (40,9 m<sup>2</sup>) = 97,8 = 98 elementos de 440 ft<sup>2</sup> cada uno.

- Número de recipientes a presión:

Número total de recipientes a presión requeridos = (número total de elementos) / (número de elementos por recipiente a presión)

98 elementos / 6 elementos por recipiente = 16,33 = 17 recipientes

5. En sistemas de agua salobre, en general, el porcentaje de recuperación va del 40% al 90%, siendo el rango típico promedio del 70 al 80%. De este rango se elige el valor medio como el más adecuado para el diseño del sistema propuesto, es decir, que se espera un 75% de recuperación del sistema. Para obtener tal eficiencia, de acuerdo a las recomendaciones del proveedor para sistemas de agua salobre, se requiere que los 17 recipientes calculados del sistema sean distribuidos en dos etapas en una proporción de 2 a 1, o razón de etapas 2:1, es decir, que la primera etapa debe tener el doble de recipientes que la segunda. Para que lo anterior pueda ocurrir, el número de recipientes a presión debe de ser 18, para que 12 de ellos correspondan a la primera etapa y los restantes 6 a la segunda. Esta configuración acomoda a los 12 elementos de la primera etapa conectados en paralelo al igual que a los 6 elementos de la segunda etapa. A su vez se tendrán en total 12 elementos de membrana conectados en serie, al contener cada recipiente a presión a seis elementos.

# C: Composición del agua de alimentación

Ejemplos de la variación en la composición de las aguas salobres para muestras de diferentes partes del mundo.

**Tabla C.1 Ejemplos de composición de agua salobre**  
Fuente: Dow Chemical Company, 2010

Parámetro	Unidad	Agua de pozo <sup>a</sup>	Agua de pozo <sup>b</sup>	Agua de lago <sup>c</sup>	Agua superficial <sup>d</sup>	Efluentes terciarios pre-tratados <sup>e</sup>
calcio	mg/L	84	113	54	102	40 - 64
magnesio	mg/L	6	2,70	23	11	-
sodio	mg/L	36	23	87	20	150 - 200
potasio	mg/L	3,30	2	6,60	4	-
hierro	mg/L	<0,05	0,20	0,05	ND-015	0,02 - 0,09
manganeso	mg/L	0,01	0,10	<0,01	<0,01	<0,05
bario	mg/L	0,07	0,10	0,09	-	0,01-0,1
estroncio	mg/L	0,70	1	1	-	0,2-1
amonio	mg/L	<0,05	-	-	0,30	22 - 66
aluminio	mg/L	0,02	-	0,02	ND-0,15	0,03
cloro	mg/L	45	52	67	33	150 - 500
bicarbonato	mg/L	265	325	134	287	28,8 - 97,6
sulfato	mg/L	24	8	201	56	120 - 160
nitrato	mg/L	4,30	4	<1.0	15	40 - 60
fluoruro	mg/L	0,14	0,70	-	0,25	0,7 - 0,7
fosfato	mg/L	<0,05	0,60	0,01	1,20	6,1 - 12,2
dióxido de silicio	mg/L	9	11	3,10	7 - 17	6 - 10
sulfito de hidrógeno	mg/L	-	1,50	-	-	ND
TDS	mg/L	478	377	573	400	500 - 1.300
TOC	mg/L	1,50	10	3,60	2,40	20 - 30 (COD)
color	Pt	<5	40	-	<5	13 (Hazen)
turbidez	NTU	-	-	-	2 - 130	0,4 - 1,7
pH	-	7,50	7,40	8,20	8	6,6 - 7,4
conductividad	μS/cm	590	-	879	400 - 700	700 - 2.200
temperatura	°C	12	23-28	-	3-25	25 - 35

<sup>a</sup> Agua de pozo: Alemania; <sup>b</sup> Agua de pozo: Florida, EE.UU.; <sup>c</sup> Lago Mead, Nevada EE.UU.; <sup>d</sup> Río Oise, Francia; <sup>e</sup> Efluente terciario: agua industrial en Jurong Island, Singapore

Ante la falta de información precisa sobre la composición del agua del acuífero San Quintín, se tomaron los valores “de base”, contenidos en la tabla C.2 siguiente, que corresponden a datos de la tabla C.1 anterior, sobre el agua salobre de pozo. La composición “teórica supuesta” para este trabajo tomó tales valores pero sólo de los componentes presentes en el agua del acuífero reportados por la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua, 2010), salvo el del cloro y el del sodio, al proponerse que ambos elementos representan, en conjunto 3.000 ppm, de los 3.014 ppm promedio que señala el citado organismo que contiene el agua del acuífero San Quintín. De modo que el contenido final de TDS de la composición “teórica supuesta” empleada en este trabajo quedó en 3.461,38 ppm.

**Tabla C.2: Composiciones, de base o estándar y supuesta, del agua de alimentación**

<b>AGUA SALOBRE</b>		
	<b>De</b>	<b>Teórica</b>
	<b>base</b>	<b>supuesta</b>
<b>muestra</b>	<b>547</b>	<b>3.000</b>
TDS	547,41	3.461,38
NH <sub>4</sub>	4,00	-
K	2,00	-
Na	23,00	1.180,13
Mg	2,70	2,70
Ca	113,00	113,00
Sr	1,00	-
Ba	0,1	-
CO <sub>3</sub>	0,9	-
HCO <sub>3</sub>	325,00	325,00
NO <sub>3</sub>	4,00	-
Cl	52,00	1.819,89
F	0,6	-
SO <sub>4</sub>	8,00	8,00
SiO <sub>2</sub>	11,00	-
B	0	-
CO <sub>2</sub>	13,1	-
pH	7,6	7,6

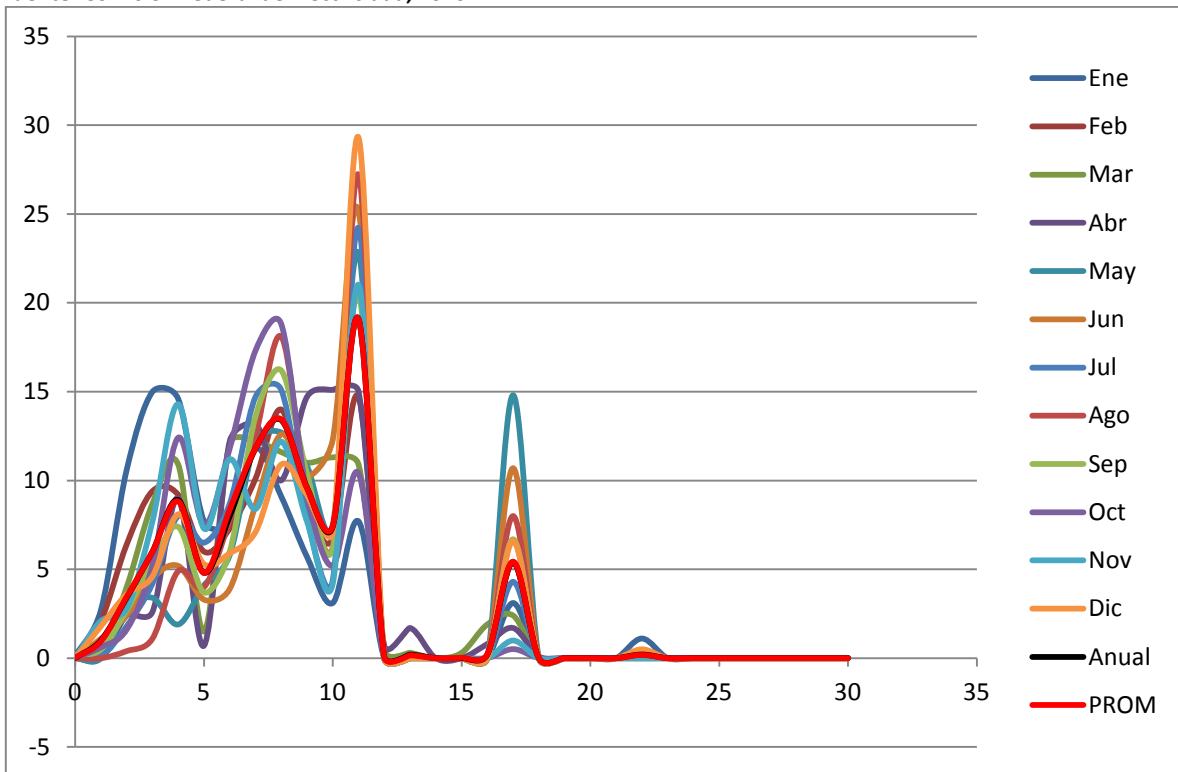


# D: Datos de viento

Tabla D.1: Distribución de frecuencias de velocidad mensual de viento en Guerrero Negro, Baja California Sur  
Fuente: Comisión Federal de Electricidad, 2010

m/s	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0
1	2,7	2,1	0,5	0	0	1,1	0,1	0	0,5	0,6	2,1	1,8	1
2	10,6	6,4	4	2,4	2,7	2,4	1,8	0,4	2,7	1,6	2,8	3,6	3,4
3	15	9,4	8,7	2,6	3,4	4,5	4,2	1,1	5,4	5,2	7,7	4,6	6
4	14,6	9,2	10,9	9	1,9	5,2	8	4,9	7,4	12,4	14,3	8,1	8,9
5	7,7	6	1,5	0,7	4,1	3,3	6,5	4	3,7	7,5	7,3	5,3	4,8
6	7,6	7,3	12,1	12,2	5,8	3,9	8,7	7,8	6	11,8	11,2	5,9	8
7	11,8	10,1	12,2	13,2	12,2	8,6	14,7	12,5	13,6	17,3	8,4	7,1	11,8
8	9,1	14	11,6	10	12,7	12,6	15,1	18,1	16,2	18,8	12,2	10,9	13,4
9	5,7	8,8	11	14,7	10,8	10,2	7,9	9,3	10,4	9,2	7,7	9,2	9,6
10	3,1	6,7	11,3	15,1	7,5	12,3	4,4	6,3	6,2	5,2	4,2	7,1	7,4
11	7,7	14,7	10,9	15	22,8	25,2	24,2	27,2	20,6	10,4	21	29,3	19,1
12	0	0	0,4	0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
13	0	0	0,3	1,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	1,9	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2
17	3,1	5,4	2,4	1,7	14,8	10,7	4,3	8	6,7	0,5	1	6,6	5,4
18	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	1,1	0	0	0	0,2	0	0	0,4	0	0	0	0,5	0,2

Gráfica D.1: Distribución de frecuencias de velocidad mensual de viento en Guerrero Negro, Baja California Sur  
Fuente: Comisión Federal de Electricidad, 2010



# X. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Aguirre-Muñoz, A., & Buddemeier, R. W. (2001). Sustainability of Coastal Resource Use in San Quintin, Mexico. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* , 142-149.

Alarcón, D., Blanco, J., & Zarza, E. (2002). *Comparación económica de procesos de desalación de agua de mar: el reto de la destilación multi-efecto con energía solar*. Almería: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas CIEMAT – PSA.

Alcocer, S. M., & Hiriart, G. (2008). An applied research program on water desalination with renewable energies. *American Journal of Environmental Sciences* .

Bermúdez-Contreras, A., Thomson, M., & Infield, D. G. (2008). Renewable Energy Powered desalination in Baja California Sur, Mexico. *Desalination* , 431-440.

Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior. (2003). *Desalting Handbook for Planners* (3a ed.). EE.UU.

Comisión Estatal de Energía. Gobierno de Baja California. (2009). Parque Eólico La Rumorosa I. Baja California, México.

Comisión Estatal del Agua de Baja California. (2008). *Plan Estatal Hídrico 2008-2013*. Mexicali: Gobierno del Estado de Baja California.

Comisión Federal de Electricidad . (21 de diciembre de 2007). *CFE. Tu Negocio*. Recuperado el 2010, de Conoce tu tarifa. Acuerdos que autorizan o modifican tarifas:  
<http://www.cfe.gob.mx/negocio/conocetarifa/acuerdosmodificantarifas/Paginas/21Dic07.aspx>

Comisión Federal de Electricidad. (2010). *Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2010-2024* . México, D.F.

Comisión Federal de Electricidad. (2010). *CFE Comisión Federal de Electricidad*. Recuperado el 2010, de Tu negocio-Conoce tu tarifa:  
<http://www.cfe.gob.mx/negocio/conocetarifa/Paginas/Tarifas.aspx>

Comisión Federal de Electricidad. (2010). Especificaciones Técnicas. *Proyecto Eólico Piloto el Vizcaíno-Guerrero Negro, B. C. S. 600 kW* . México.

Comisión Nacional del Agua. (2 de agosto de 2010). *Solicitud de Información Pública* . Mexicali, Baja California, México: Dirección General del Organismo de Cuenca Península de Baja California. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. (Junio de 2010). *Solicitud de Información Pública* . Mexicali, Baja California, México: Dirección Técnica del Organismo de Cuenca Península de Baja California. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. (2002). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero San Quintín, estado de Baja California*. México: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Comisión Nacional del Agua. (2010). *Estadísticas del Agua en México, edición 2010*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Conservation Biology Institute & The Nature Conservancy. (2007). Conservation Vision for Bahía San Quintín.

Darwish, M. A., & Al-Najem, N. M. (2009). Towards sustainable seawater desalting in the Gulf area. *Desalination* , 58-87.

Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH. (2009). Nichos de Mercado para Sistemas Fotovoltaicos en Conexión a la Red Eléctrica en México. *II Coloquio Internacional: Sistemas Fotovoltaicos conectados a la Red*. Mexicali, Baja California.

Dow Chemical Company. (2010). *Filmtec Membranes* . Recuperado el 2010, de Tech Manual Excerpt: <http://www.dowwaterandprocess.com>

García-Rodríguez, L. (2003). Renewable energy applications in desalination: state of the art. *Solar Energy* , 381-393.

Gobierno de Baja California. (2008). *Plan Estatal de Desarrollo 2008-2013*. Mexicali: Gobierno del Estado de Baja California.

Gobierno del Estado de Baja California. (2010). *Portal ciudadano Baja California*. Recuperado el 2010, de Nuestro Estado: [http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro\\_estado/situacion\\_dem/demografico.jsp](http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro_estado/situacion_dem/demografico.jsp)

Gobierno del Estado de Baja California. (2008). *Programa de Desarrollo para la Región San Quintín 2008-2013*. Gobierno del Estado de Baja California.

González, M. E., Beltrán, L. F., Troyo, E., & Ortega, A. (2006). Potencial de Aprovechamiento de la energía eólica para la generación de energía eléctrica en zonas rurales de México. *Interciencia* , 31 (004).

Grupo de Trabajo de Energía para América del Norte / Grupo de Trabajo de la Alianza para la Seguridad y la Prosperidad de América del Norte. (2006). *Perfil energético de América del Norte II*. México: Secretaría de Energía (SENER).

Hiriart, G. (2006). Desalación de agua de mar con energías renovables: interrogantes jurídicas. *Seminario Internacional Desalación de agua de mar con energías renovables*. México: Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Anuario de Estadísticas por Entidad Federativa. Edición 2010*. México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2001). *Baja California. XII Censo General de Población y Vivienda 2000*. México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2011). *Censo de Población y vivienda 2010*. México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2006). *Conteo de Población y Vivienda 2005*. México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Energía*. Recuperado el 2010, de Precio al público de productos petrolíferos:

<http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/cuadrosestadisticos/GeneraCuadro.aspx?s=est&nc=509&c=25084>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1999). *Información geográfica*. Recuperado el 2010, de Aspectos geográficos de Baja California:

[http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/bc/ubic\\_geo.cfm?c=1203&e=08&CFID=8464&CFTOKEN=23804032](http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/bc/ubic_geo.cfm?c=1203&e=08&CFID=8464&CFTOKEN=23804032)

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2000). *Marco Geoestadístico Nacional*. Recuperado el 2010, de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/default.aspx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Sistema para la consulta del cuaderno estadístico municipal Ensenada, Baja California. (2006).

Ley Federal de Derechos. Últimas Reformas. (27 de noviembre de 2009). *Diario Oficial de la Federación*, págs. 182-185.

(2008). *Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el ramo petrolero. Última Reforma DOR 28-11-08*. México: Diario Oficial de la Federación.

Maya, R. (2007). La geotermia y fuentes alternas en la generación de energía eléctrica. *Tercer Congreso Nacional de la Academia de Ingeniería*. México.

Muñoz Piña, C., & Guevara Sanginés, A. (2006). *Agriculture Demand for Groundwater in Mexico: Impact of water right enforcement and electricity user-fee on Groundwater level and quality*. Paper, Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT)-Universidad Iberoamericana, México.

Muñoz, I., & Fernández-Alba, A. R. (2008). Reducing the environmental impacts of reverse osmosis desalination by using brackish groundwater resources. *Water Research* , 801-811.

Organismo Operador Municipal del Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Los Cabos. (2010). Obtenido de <http://www.oomsapaslc.gob.mx/publico/desalinizadora>

Pemex Gas y Petroquímica Básica. Subdirección de Gas Licuado y Petroquímicos Básicos. (3 de julio de 2010). México.

Pemex Gas y Petroquímica Básica. Subdirección de Gas Natural. (julio de 2010). México.

Pemex Refinación. Subdirección de Almacenamiento y Reparto. Gerencia de almacenamiento y reparto Pacífico. (16 de julio de 2010). México.

Pemex Refinación. Subdirección de distribución. Gerencia de coordinación de operaciones de la subdirección de distribución. (17 de julio de 2010). México.

Pemex Refinación. Subdirección de distribución. Gerencia de operaciones. (16 de julio de 2010). México.

PEMEX. (23 de 03 de 2009). *Transporte, almacenamiento y distribución*. Recuperado el 2010, de Preguntas y Respuestas frecuentes de transporte, almacenamiento y distribución de petrolíferos: <http://www.pemex.com/index.cfm?action=content&sectionID=1&catID=12060>

Presidencia de la República. (2010). *Cuarto Informe de Gobierno*. México.

ProLedesma, R. M. (2010). Comunicación personal. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

RetScreen International. (2010). Obtenido de <http://retscreen.gc.ca>

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Delegación Estatal en Baja California. (2010). Información Sector Agropecuario, CADER San Quintín. Ensenada, México.

Secretaría de Energía. (2010). *Estrategia Nacional de Energía 2010*. México.

Secretaría de Energía. (2008). *Prospectiva de Petrolíferos 2008-2017*. México.

Secretaría de Energía. (2009). *Prospectiva del Mercado de Gas Licuado de Petróleo 2009-2024*. México.

Secretaría de Energía. (2009). *Prospectiva del Mercado de Gas Natural 2009-2024*. México.

Secretaría de Energía. (2009). *Prospectiva del Sector Eléctrico 2009-2024*. México.

Secretaría de Energía-Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH. (2009). *Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México 2009*. México: Secretaría de Energía (SENER).

Secretaria de Fomento Agropecuario del Estado de Baja California. (29 de abril de 2010). *Solicitud de Acceso a la Información Pública* . Mexicali, Baja California, México.

Secretaria de Fomento Agropecuario del Estado de Baja California. (2010). *Agua*. Recuperado el 2010, de <http://www.sefoa.gob.mx/agua.aspx>

Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. (mayo de 2010). México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).

The McCloskey Group. (2010). *Coal Report*. Recuperado el 2010, de <http://cr.mccloskeycoal.com/story.asp?sectionCode=71&storyCode=74665>

The Wind Power. (2011). *wind turbines and wind farms database*. Obtenido de <http://www.thewindpower.net>

Torres Corral, M. (Octubre de 2004). Avances tecnológicos en la desalación de aguas. *Ambienta* , 17-26.

Valero, A., Uche, J., & Serra, L. (2001). *La Desalación como alternativa al PHN*. Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos-Universidad de Zaragoza, Aragón.

Wilf, M. (2010). *Nitto Denko* . Obtenido de Technical Papers: [http://www.membranes.com/index.php?pagename=tech\\_papers](http://www.membranes.com/index.php?pagename=tech_papers)

World Health Organization. (2007). *Desalination for Safe Water Supply. Guidance for the Health and Environmental Aspects Applicable to Desalination*. Geneva.