

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS  
COLEGIO DE GEOGRAFIA

EDUARDO ANTARAMIAN HARUTUNIAN

EL AGUA DE MAR COMO RECURSO EN LA  
REPUBLICA MEXICANA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
LICENCIADO EN GEOGRAFIA

México, D. F.

17074

1966

1604



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

*A mi esposa  
María Luisa y*

*A mi hija  
Verónica*

*Agradezco al Maestro Jorge Rivera  
la dirección de este trabajo.*

*Al Doctor Jorge A. Vivó  
la valiosa ayuda prestada*

*Y a la Señorita Consuelo Soto Mora,  
Directora del Instituto de Geografía de  
la UNAM, quien permitió la realiza-  
ción de este trabajo en el propio Instituto.*

## CAPITULO I

### CRECIMIENTO ACELERADO DE LA POBLACION Y LOS RECURSOS HIDROLOGICOS

La población de la Tierra va en rápido aumento y las fuentes de agua potable o para otros usos son constantes por lo que el hombre ha ido utilizando cada vez una parte mayor de sus recursos de agua, en muchas regiones utiliza el 100% y algunas localidades no se desarrollan por la escasez del líquido.

En la República Mexicana gran porcentaje de su superficie comprende a zonas secas, áridas ó semiáridas, donde la falta de agua es un factor que entorpece su desarrollo. Por su posición geográfica y la orientación de sus sistemas montañosos le corresponde alrededor del 30% de las zonas áridas y semiáridas de Norteamérica.

Para lograr el desarrollo del país es necesario aprovechar al máximo los recursos hidrológicos; pero como éstos están limitados porque la precipitación en más de la mitad del territorio es deficiente, deberá en un futuro próximo recurrirse al mayor depósito de agua que son los Océanos contiguos. El agua de mar, tiene sin embargo un 3.5% de sales disueltas que la hace inadecuada para casi todos los usos en la agricultura, la industria y los domésticos.

Actualmente se están desarrollando una serie de técnicas para potabilizar el agua de mar; del éxito de estas técnicas dependerá en gran parte el futuro del hombre.

En la presente década se ha superado la barrera de un dolar por mil galones o sea aproximadamente 3,00 pesos por metro cúbico, aunque esto la hace todavía inaccesible para la agricultura y la mayoría de las industrias. Pero para usos domésticos ya empieza a competir con el costo del agua, en los lugares en que es más cara.

En la República Mexicana el aumento explosivo de la población, por una parte, y el porcentaje tan elevado de zonas áridas y semiáridas por otra, debe obligarnos a realizar estudios de estas técnicas e instalar plantas en las regiones más necesitadas.

La necesidad de hacer estudios en este sentido resulta al ver el ritmo de aumento de población en la República Mexicana como lo indican los censos:

Año	Población censada
1890	11 492 928
1895	12 532 427
1900	13 667 272

1920	14 252 221	#
1921	14 334 780	
1930	16 552 722	
1940	19 653 552	
1950	25 789 104	
1960	34 923 129	

# Población estimada.

El aumento de población desde la independencia es el siguiente:

1800 - 1850	Un millón cada 25 años
1850 - 1900	Un millón cada 10 años
1900 - 1910	Un millón cada 5 años
1910 - 1920	Disminuyó la población
1920 - 1930	Un millón cada 5 años
1930 - 1940	Un millón cada 3 años
1940 - 1950	Un millón cada 2 años
1950 - 1960	Un millón cada año

Con los datos de población calcularemos la curva que sigue a fin de poder estimar poblaciones futuras para los años 1966, 1970, 1980 y 2000.

Suponiendo que sea una función parabólica que siga la ecuación general de tercer grado:

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

la que calculamos por el método de los mínimos cuadrados y tomando los datos de población con cinco cifras.

$$S_1^n y = a S_1^n x^3 + b S_1^n x^2 + c S_1^n x + n d$$

$$S_1^n xy = a S_1^n x^4 + b S_1^n x^3 + c S_1^n x^2 + d S_1^n x$$

$$S_1^n x^2 y = a S_1^n x^5 + b S_1^n x^4 + c S_1^n x^3 + d S_1^n x^2$$

$$S_1^n x^3 y = a S_1^n x^6 + b S_1^n x^5 + c S_1^n x^4 + d S_1^n x^3$$

Si aplicamos dichas formulas a los datos de población, a partir de 1920, para no considerar el período de la revolución que causó una tendencia anormal en la curva de población, obtenemos la siguiente tabla:

Año	Población	x	x <sup>2</sup>	x <sup>3</sup>	x <sup>4</sup>	x <sup>5</sup>	x <sup>6</sup>
1920	14 252	1	1	1	1	1	1
1930	16 553	2	4	8	16	32	64
1940	19 654	3	9	27	81	243	729
1950	25 789	4	16	64	256	1 024	4 096
1960	34 923	5	25	125	625	3 125	15 625
	<u>111 171</u>	<u>15</u>	<u>55</u>	<u>225</u>	<u>979</u>	<u>4 425</u>	<u>20 515</u>

Estos valores los sustituimos en la primera ecuación y obtenemos:

$$111\ 171 = 225 a + 55 b + 15 c + 5 d$$

O sea que tenemos una ecuación con cuatro incógnitas y para poderla resolver necesitamos otras tres ecuaciones que las obtenemos sustituyendo cada una de las sumaciones en las ecuaciones anteriores.

xy	x <sup>2</sup> y	x <sup>3</sup> y
14 252	14 252	14 252
33 106	66 212	132 424
58 962	178 886	530 658
103 156	412 624	1 650 496
174 615	873 075	4 365 375
<u>384 091</u>	<u>1 543 049</u>	<u>6 693 205</u>

Las ecuaciones obtenidas sustituyendo dichos valores son:

$$111\ 171 = 225 a + 55 b + 15 c + 5 d$$

$$384\ 091 = 979 a + 225 b + 55 c + 15 d$$

$$1\ 543\ 049 = 4\ 425 a + 979 b + 225 c + 55 d$$

$$6\ 693\ 205 = 20\ 515 a + 4\ 425 b + 979 c + 225 d$$

Resolviendo estas ecuaciones se obtiene:

$$a = 183.25000$$

$$b = - 456.392857$$

$$c = 2\ 225.357142$$

$$d = 12\ 332.200$$

Y la ecuación de la población es:

$$y = 183.25 x^3 - 456.392857 x^2 + 2\ 225.357142 x + 12\ 332.2$$

En donde 1 000 y nos da la población y  $x = (\text{año} - 1910)/10$

Sustituyendo los valores de "x" para los diferentes años calculamos la población futura y se obtiene el siguiente cuadro:

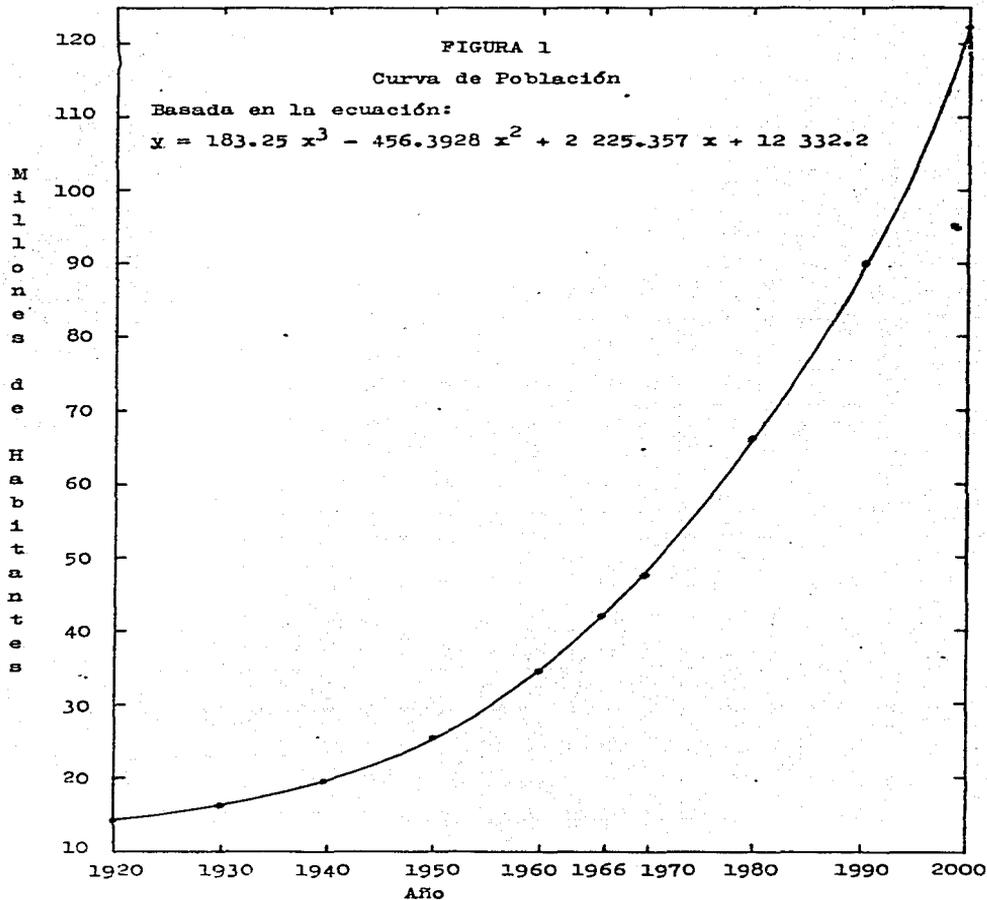
Año	Población		% Error
	Calculada	Censada	
1920	14 284 414	14 252 221	+ 0.226
1930	16 423 343	16 552 722	- 0.782
1940	19 848 485	19 653 552	+ 0.992
1950	25 659 342	25 789 104	- 0.503
1960	34 955 414	34 923 129	+ 0.092
1966	42 663 351		
1970	48 836 199		
1980	68 401 199		
1990	94 749 913		
2000	128 981 842		
2066	631 673 235		
		Total	2.595
		Algebraico	+0.025

En forma semejante se hace el cálculo de la curva a partir de los datos desde 1890, obteniéndose los siguientes resultados:

Año	Población		% Error
	Calculada	Censada	
1890	11 591 235		+ 0.855
1900	13 621 725		+ 0.106
1910	14 458 348		- 4.634
1920	15 082 590		+ 5.826
1930	16 475 934		- 0.464
1940	19 619 866		- 0.171
1950	25 495 870		- 1.137
1960	35 085 431		+ 0.465
1966	43 029 973		
1970	49 370 036		
1980	69 331 166		
1990	95 950 308		
2000	130 203 948		
2066	618 479 382		
		Total	13.658
		Algebraico	0.486

Y se nota que el porcentaje de error es menor cuando se calcula a partir de 1920 y esos son los datos que consideraremos.

Con los datos de la ecuación de la población ( de 1920) se trazó la curva de la Figura 1 en la que puede apreciarse la población de la República Mexicana para fechas futuras.



Además el promedio de consumo de agua debe aumentarse, no sólo por la industrialización del país sino porque hay todavía muchas poblaciones que carecen del líquido, aún para usos domésticos. De esto concluimos que la curva de necesidades de agua debe tener una pendiente mayor y la única forma de suplir estas necesidades futuras es recurriendo al agua de mar, que la podemos considerar como una fuente inagotable del preciado líquido.

Se pueden hacer otros cálculos de población, por ejemplo suponiendo que sigue la regla del interés compuesto, siendo el interés o incremento la diferencia entre la natalidad y la mortalidad; ya que la emigración y la inmigración no son significativas.

El cálculo se efectúa con la siguiente ecuación:

$$P = P_0(1 + i)^r$$

Siendo  $P_0$  la población del último censo o sea 34 923 129 habitantes, "i" la diferencia entre la natalidad y la mortalidad para el mismo año de 1960 o sea:

Índice de Natalidad	46.0
Índice de Mortalidad	11.5

$$i = 34.5$$

Y "r" es el número de años transcurridos a partir de 1960.

Los resultados que se obtienen son los siguientes:

Año	Población
1966	42 805 279
1970	49 025 088
1980	68 819 518
1990	96 607 852
2000	135 616 987
2066	1 272 005 128

De acuerdo con Malthus la curva de la población es  $y = PA^x$  y es el criterio seguido para el cálculo de la población probable por la Dirección General de Estadística. Esta ecuación nos da los siguientes resultados:

Año	Población
1966	41 890 293
1970	47 232 901
1980	64 042 034
1990	86 724 606
2000	117 439 428
2066	868 747 757

Ansley J Coale y Edgar M Hoover de la Universidad de Princeton, New Jersey han hecho la proyección de la población de México para el período 1955 - 1985 cuyos resultados se resumen en el siguiente cuadro:

Año	Población en millares.		
	Sin cambio en la fecundidad	Si la fecundidad disminuye 50% 1955 - 1980	Si la fecundidad disminuye 50% 1965 - 1980
1955	30 798.0	30 798.0	30 798.0
1960	36 060.0	35 719.4	36 060.0
1965	42 400.2	40 912.6	42 400.2
1970	50 099.5	46 372.6	49 298.1
1975	59 454.3	51 966.6	55 923.3
1980	70 895.3	57 471.4	61 946.5
1985	84 897.4	63 252.7	68 171.3

Todos los calculos anteriores nos indican que cualquiera que sea el criterio que consideremos para calcular la población futura de la República Mexicana nos da cifras alarmantes, lo cual debe llevarnos a pensar en la necesidad de recurrir al agua de mar para satisfacer la creciente demanda del indispensable líquido.

## CAPITULO II

### ZONAS ARIDAS Y SEMIARIDAS DEL PAIS

Una vez que se ha analizado la naturaleza del crecimiento de la población en el país, se hace necesario considerar la significación de la aridez en el mismo.

Para definir las zonas áridas y semiáridas hay diferentes criterios, unos de carácter netamente meteorológico, que se basan en datos de precipitación y temperatura; otros de carácter biogeográfico, que consideran los diferentes tipos de vegetación natural y otros más de carácter económico, que toman en cuenta la potencialidad agropecuaria.

Pero todos los criterios consideran como factor definitivo la precipitación.

La distribución de la precipitación y, por lo tanto, la localización de las regiones áridas se debe principalmente a la circulación general de la atmósfera, las características del relieve y la cercanía o lejanía de los recursos hidrológicos.

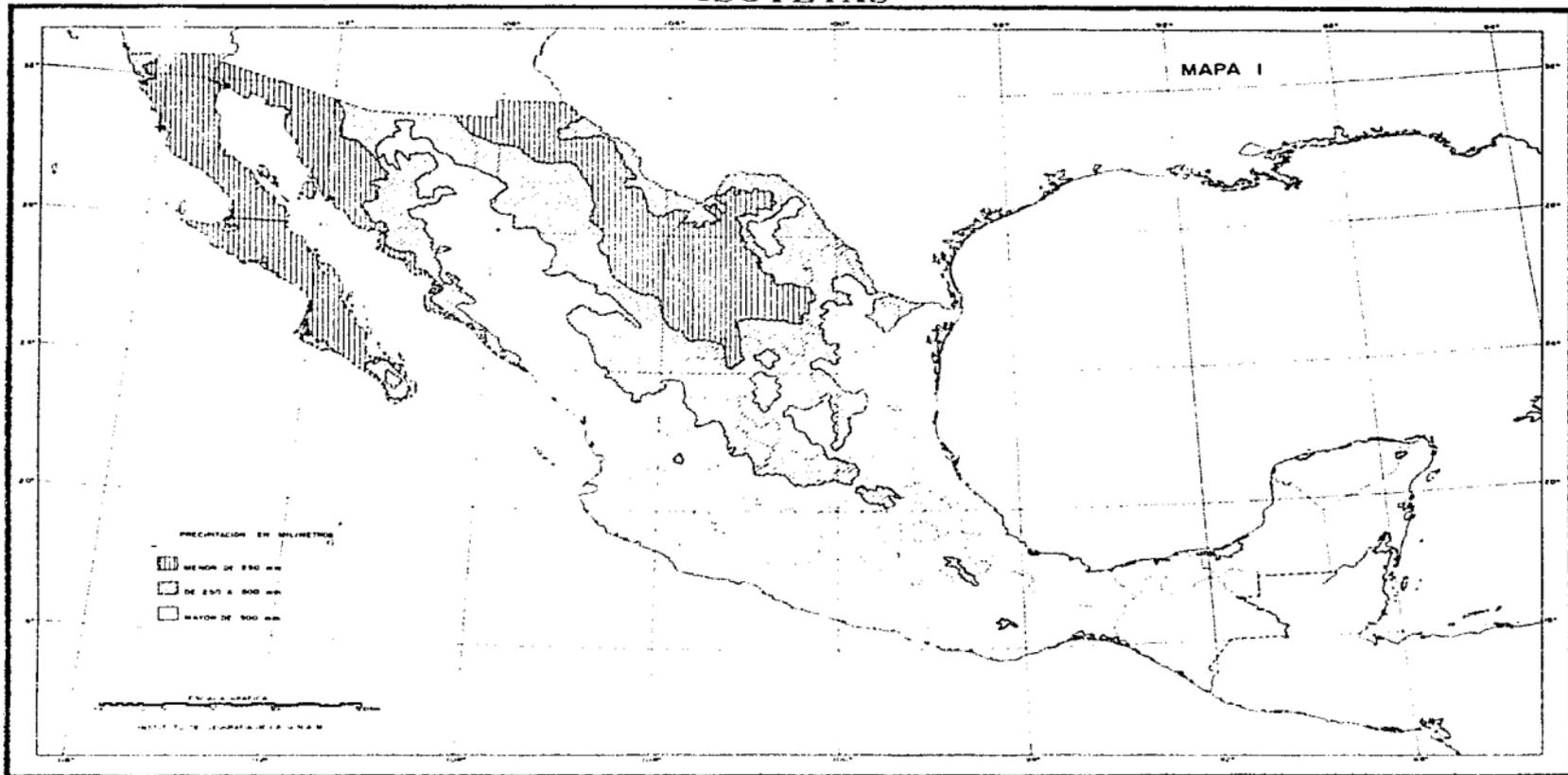
En la República Mexicana, debido a la latitud, las corrientes aeres dominantes tienen una marcada componente oriental, y las masas de aire más importantes proceden del Golfo de México y del Mar Caribe, en regiones tropicales del Atlántico, así como del Pacífico.

La precipitación por lo general va disminuyendo del sureste al noroeste. Y en las sierras se observa un contraste en el que hay mayor precipitación sobre el declive orientado hacia el mar. Y cuando del lado de la sombra edifica hay un valle profundo se producen áreas áridas debido al resecamiento del aire ocasionado por el descenso. Esto explica que en la parte central y sur de la República existan áreas aisladas con deficiencia pluvial.

De una manera muy general pueden considerarse como zonas desérticas aquellas en que la precipitación anual es menor de 250 milímetros y semiáridas las que tienen una precipitación anual que queda comprendida entre 250 y 500 milímetros. Aunque este criterio es muy pobre, ya que las condiciones de aridez dependen también de la temperatura media, y de las temperaturas máximas y mínimas, de la estación en que se concentran las lluvias y otros factores como la nubosidad, la porosidad del suelo, etc.

En el mapa No 1 pueden observarse las áreas en las que la lluvia

# ISOYETAS



es menor de 250 milímetros anuales, en las que oscila entre 250 y 500 y las que tienen más de 500 milímetros. Como se aprecia la mayor parte de las zonas del país con escasa precipitación se concentran en el norte. También puede estimarse la influencia de los principales sistemas montañosos.

Para delimitar las zonas áridas se ha delimitado una serie de índices y entre los más conocidos se encuentran el de Martonne, el de Koeppen, el de Emberger y uno derivado de éste para aplicarlo al territorio de la República Mexicana, de los meteorólogos Stretta y Mosiño.

El índice de áridez de Martonne está expresado por la fórmula:

$$I = \frac{P}{t + 10}$$

Donde I es el índice de áridez, P la precipitación media anual en milímetros y t la temperatura media anual en °C.

El cociente de los siguientes valores establecidos por el autor:

Índices

- 1 - 5 arreísmo: desierto, regiones sin corrientes fluviales.
- 5 - 10 endorreísmo: regiones que rodean al desierto, corrientes temporales y vegetación pobre. Exige riego para los cultivos.
- 10 - 30 exorreísmo: 10 - 20 el relieve decide la forma de la vertiente; cosechas de temporal.  
20 - 30 las corrientes fluviales llegan al mar.
- 30 - 40 corrientes fluviales perennes. No es necesario el riego.
- 40 -160 corrientes permanentes y abundantes.

La Comisión Nacional de Irrigación elaboró un mapa basado en este índice, tomando en cuenta los datos de 387 estaciones termopluviométricas.

El índice de áridez de Emberger toma en cuenta tres factores que son la precipitación anual "P", sin considerar la época del año en que ésta se concentra. La temperatura, pero no se toma en cuenta el promedio anual ya que eliminaría la influencia de las extremas, sino que se considera la media de las máximas del mes más caliente "M" y la media de las mínimas del mes más frío "m".

En cuanto a la evaporación, por la falta de su medición directa en las estaciones meteorológicas, la considera como función de la diferencia M - m.

El autor obtiene la expresión:

$$Q = \frac{100 P}{(M + m)(M - m)}$$

Donde

Q = índice de aridez

P = precipitación anual promedio en milímetros.

M = temperatura media de las máximas del mes más caliente.

m = temperatura media de las mínimas del mes más frío.

El valor de este índice es menor cuanto más árido es el lugar.

Mosiño y Stretta calculan el índice de aridez, aplicándolo al territorio de la República Mexicana, considerando que el valor de dicho índice aumenta cuando disminuye la precipitación.

El valor que se calcula está dado por la ecuación:

$$I_A = \frac{(m + 45) 100}{Q} \quad \text{Siendo } Q \text{ el índice de Emberger.}$$

o sea:

$$I_A = \frac{(m + 45)(M + m)(M - m)}{P}$$

Con esta ecuación se determinan las zonas áridas, localizándolas en tres regiones que son:

1. Altiplanicie.- Entre las sierras Madres Oriental y Occidental, en los estados de Coahuila y Chihuahua, se encuentran las extensiones áridas más importantes. En los Estados de Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, y Nuevo León hay un menor grado de aridez, por la altitud. Y al sur de la Meseta Central se extienden angostos pasillos de zonas semiáridas en Hidalgo y Querétaro.

2. Baja California.- Se encuentra otra área semidesértica en las costas orientales de Baja California y al Noroeste de Sonora.

3. Zonas sur y sureste. Se localizan sectores de carácter árido alrededor de Tehuacán y en el cañón de Tomellín, Oaxaca, debido a las altas serranías que los rodean y aíslan de los vientos húmedos tanto del Golfo como del Pacífico.

Existen también otras zonas semiáridas en partes de la Depresión de los ríos Balsas y Tepalcatepec, en Michoacán, Guerrero y Jalisco; y, por último, en la Península de Yucatán hay una faja costera al norte de Mérida con carácter semiárido.

Los autores han tabulado las áreas con diversos grados de aridez estableciendo la siguiente tabla:

Valores de $I_A$	Nomenclatura	Porcentaje en relación con el área total del país.	
Más de 500	Zonas desérticas	4.31%	
De 118 a 500	Zonas áridas	33.92%	71.66%
De 53 a 118	Zonas semiáridas	33.43%	
De 38 a 53	Zona de transición	11.75%	22.16%
De 28 a 38	Zona semihúmeda	10.41%	
De 18 a 28	Zona húmeda	4.77%	6.22%
Menos de 18	Zona muy húmeda	1.45%	

Para clasificar los climas, Koeppen considera: 1) la época del año en que se concentra la lluvia, 2) la temperatura media anual y 3) la precipitación.

Los climas los agrupa en cinco zonas:

- A Clima tropical lluvioso
- B Clima seco
- C Clima templado lluvioso
- D Clima frío
- E Clima polar.

De las cuales para el presente estudio interesa la zona B ó seca, la cuál tiene dos tipos: BS Clima de estepa y BW Clima de desierto.

Según la época en que se concentren las lluvias, el criterio para delimitar si el clima es desértico, estepario ó húmedo es el siguiente:

Lluvias en invierno:

r menor o igual que t	desierto	BW
r entre t y 2t	estepa	BS
r mayor que 2t	húmedo	A, C, D

Lluvias en todas las estaciones:

r menor ó igual que (t+7)	desierto	BW
r entre (t+7) y 2(t+7)	estepa	BS
r mayor que 2(t+7)	húmedo	A, C, D

Lluvias en verano:

r menor o igual que (t+14)	desierto	BW
r entre (t+14) y 2(t+14)	estepa	BS
r mayor que 2(t+14)	húmedo	A, C, D

Donde: r = cantidad de lluvia anual en centímetros  
t = temperatura media anual en grados centígrados.

De acuerdo con este criterio se ha elaborado el Mapa No 2 en el que se observa que casi toda la Península de Baja California es BW (desértico) excepto el noroeste que es BS (estepario) y las Sierras que también son de BS. El noroeste de Sinaloa también es BW, al igual que gran parte de los Estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila, noreste de Durango, norte de Zacatecas y una parte del norte de San Luis Potosí.

Tienen clima BS el este de Sonora y gran parte de Sinaloa, Durango y Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Zacatecas, Aguascalientes, Hidalgo, Querétaro, algunas zonas de Chihuahua y Jalisco y parte de la depresión de los ríos Tepalcatepec y Balsas, en Michoacán y Guerrero, y en Puebla y Oaxaca los Valles de Tehuacán y Tomolín.

Otro criterio, que es biogeográfico, para clasificar el clima y que serviría en parte para poder apreciar el valor de los criterios anteriores es el de las zonas de vegetación, cuya carta se incluye en el Mapa No 3.

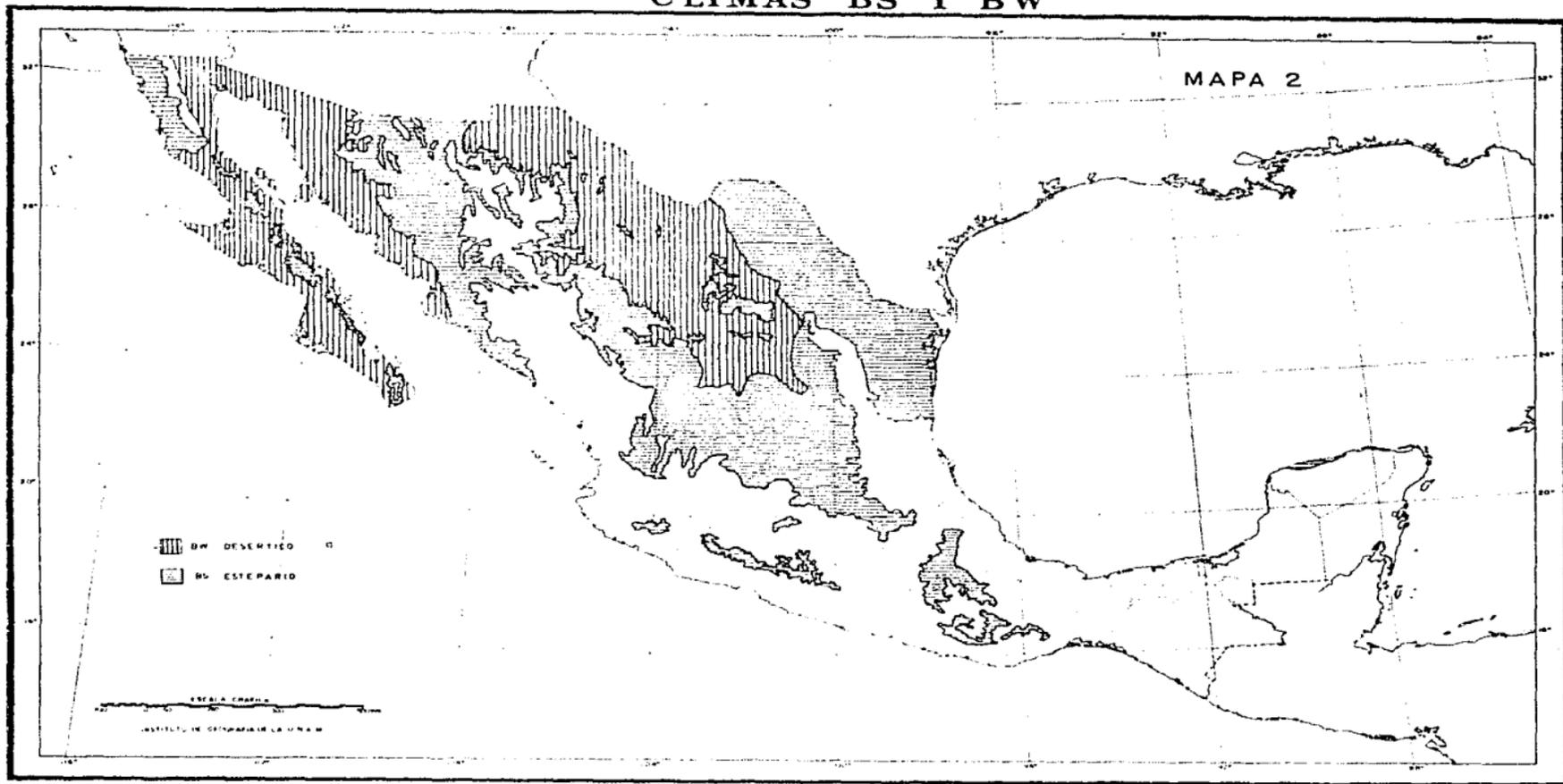
Sin embargo, casi todos los sistemas anteriores tienen defectos ya que no delimitan con exactitud las zonas áridas y semiáridas, pero algunos tienen una aproximación muy aceptable como el de Köppen y el de Mosiño - Stretta para el territorio de la República Mexicana.

Las fallas con que cuentan las naturales, puesto que la tendencia es a delimitar las zonas secas basándose en los datos meteorológicos existentes, de los cuales sólo se puede contar con los de lluvia y temperatura, ya que son los índices de los que se tiene un registro en gran número de estaciones.

Si se quisiera delimitar las zonas áridas y semiáridas con exactitud sería necesario tomar en cuenta numerosos factores como precipitación, temperatura promedio, temperaturas extremas, evaporación, evapotranspiración, infiltración, época en que se concentra la lluvia, etc, para que con todos estos factores fuera posible calcular la cantidad de agua con que en realidad se dispone.

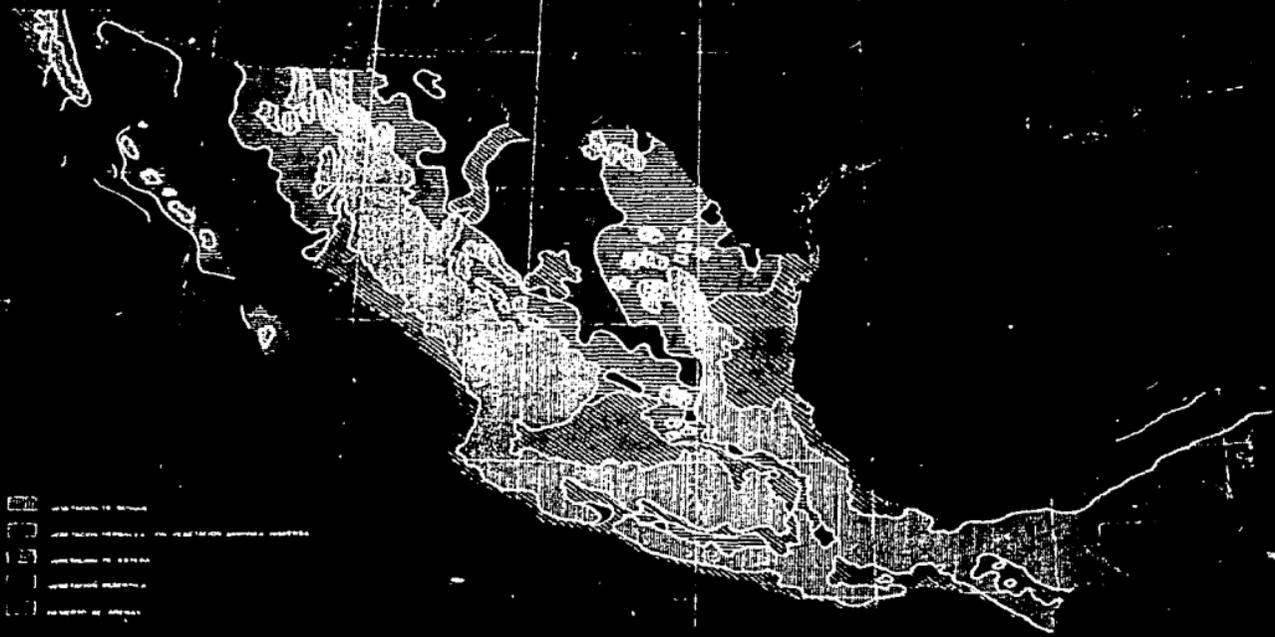
De los factores antes mencionados se cuenta con registro continuo de la temperatura y de la precipitación. En cuanto a la evaporación no son muchas las estaciones que la registran, aunque podría calcularse teóricamente a partir de datos de la insolación y temperatura, la diferencia de la presión de vapor del agua y la presión de vapor de la humedad en el aire, la velocidad del viento, etc.

# CLIMAS BS Y BW



# VEGETACION

MAPA 4



- Vegetación de montaña
- Vegetación de montaña y de las zonas altas de las sierritas
- Vegetación de montaña
- Vegetación de montaña
- Vegetación de montaña

La evaporación en el suelo está en relación con la precipitación y se puede calcular con fórmulas como:

$E = a P + b$                       donde  $E =$  evaporación y  $P =$  precipitación  
 Y "a" y "b" son coeficientes que se pueden calcular experimentalmente para los diferentes tipos de suelos.

Así, Greaves, Dickinson y Evans en Inglaterra han encontrado que para suelos no arenosos, la evaporación expresada en milímetros está dada por:  $E = 0.549 P + 110.5$

Para suelos arenosos:

$$E = 0.189 P - 13.4 \quad (\text{desde } F = 71 \text{ mm})$$

Y para suelos de tipo migajón:

$$E = 0.516 P + 2.3$$

Aunque estos criterios no pueden aplicarse muy bien en zonas en que la precipitación es muy escasa, porque prácticamente toda se pierde por evaporación, especialmente en ciertas áreas desérticas del país.

La infiltración se puede calcular a partir de la ecuación hidrológica que está basada en el balance de agua y está expresada por:

$$P = S + E + I \quad \text{donde } P = \text{precipitación}$$

$$S = \text{escurrimiento superficial}$$

$$E = \text{evaporación}$$

$$I = \text{infiltración.}$$

Los datos de escurrimiento se calculan por medio de estaciones de aforo repartidas en las diferentes cuencas y de las cuales se cuenta con 101 en la República Mexicana.

Conociéndose la precipitación "P", el escurrimiento superficial "S" y la evaporación "E", la infiltración se calcula despejándola de la fórmula:

$$I = P - (S + E)$$

Este valor de infiltración corresponde al agua que teóricamente se puede extraer del suelo sin abatir los niveles hidrostáticos.

Basándose en estos criterios, Alfonso de la O Carreño ha calculado el balance hidrológico en el territorio de la República Mexicana y en el período analizado de 1932 a 1946, ha encontrado los siguientes grandes totales:

		Porcentaje de la precipitación
Se precipitan	1 377 879 millones de m <sup>3</sup>	
escurren	258 626 millones de m <sup>3</sup>	18.77
Se evaporan	848 558 millones de m <sup>3</sup>	61.59
Se infiltran	270 695 millones de m <sup>3</sup>	<u>19.64</u>
		100.00%

En resumen, puede decirse que aunque los criterios de los índices de aridez difieren bastante, sin embargo todos concuerdan en delimitar como zonas áridas un porcentaje elevado del territorio de la República, concentrándose la mayor extensión en el Noroeste abarcando gran parte de Sonora y la casi totalidad de la Península de Baja California, en el Noreste parte de Tamaulipas, gran parte del norte de la Altiplanicie y áreas de la depresión del Balsas-Tepalcatespec y los valles de Tehuacán y Tomellín así como el extremo noroeste de la Península de Yucatán.

El análisis que se ha venido haciendo sobre los índices de aridez en México, demuestra que el país cuenta con limitados recursos naturales, en general, para satisfacer las necesidades de una población en aumento progresivo, debido principalmente a los escasos recursos hidrológicos con que cuenta.

### CAPITULO III

#### GENERALIDADES SOBRE EL AGUA DE MAR

##### COMPOSICION QUIMICA.

Sobre la base del estudio de los dos aspectos básicos para planear el futuro de México: la población en aumento elevadísimo y la escasez de recursos hidrológicos, nos lleva a considerar la posibilidad de utilizar el agua de mar para conjugar el déficit en los recursos hidrológicos.

Pero antes de entrar en el análisis técnico de la desalinización del agua de mar, se tratará sobre algunas generalidades acerca del mar.

Los elementos más abundantes en el Universo son el hidrógeno y el helio, y aquellos que tienen peso atómico múltiplo de cuatro, en los que el átomo de helio se puede considerar como una unidad secundaria en la formación de los núcleos de los mismos; así, por ejemplo, son muy abundantes en la naturaleza los elementos con peso atómico:  $4$  (helio)  $3 \times 4 = 12$  (carbono)  $4 \times 4 = 16$  (oxígeno)  $6 \times 4 = 24$  (magnesio)  $7 \times 4 = 28$  (silicio)  $8 \times 4 = 32$  (azufre)  $10 \times 4 = 40$  (calcio); los cuales, junto con el hidrógeno, constituyen más del 90% de la materia del Universo.

Esta composición química del universo en general contrasta con la de la Tierra, en la que predomina el hierro, y aún más con la de la corteza terrestre en la que los elementos más frecuentes son: el oxígeno, el silicio, el aluminio, el hierro, el calcio, el sodio, el potasio y el magnesio.

El hidrógeno y el helio fueron también muy abundantes al formarse la Tierra, pero debido a la elevada temperatura que había en un principio, y por lo tanto, la gran energía cinética de estos gases ligeros, la mayor parte del hidrógeno y del helio escaparon del campo gravitacional de la Tierra.

Gran parte del hidrógeno remanente se combinó más tarde con el oxígeno, formando vapor de agua, el cual, cuando la temperatura de la Tierra llegó a ser menor de los  $100^{\circ}\text{C}$ , se condensó y precipitó en lluvias que formaron los mares originales, los que se componían de agua pura, esto es sin sales. Pero desde esa época se inició el ciclo hidrológico, el cual fué haciendo que el contenido de las sales del agua de mar fuera en constante aumento.

En el agua de mar puede considerarse que se encuentran todos los elementos, la mayor parte de ellos en concentraciones bajísimas, y son

más abundantes aquellos que teniendo preponderancia en la constitución de las rocas también son más solubles.

Algunos elementos han sufrido una selección natural, por ejemplo el potasio que, siendo casi igual de abundante que el sodio en la corteza terrestre y sus sales igual de solubles, en el mar se encuentra en concentraciones mucho menores, debido a que las plantas lo fijan en gran parte.

Así mismo el calcio y el silicio se encuentran en cantidades menores que las esperadas, debido a que muchos organismos marinos los utilizan para formar sus esqueletos y caparazones.

Se ha calculado que todos los ríos del mundo transportan anualmente de la superficie terrestre a los océanos cerca de tres mil millones de toneladas de las mencionadas sustancias en disolución.

Por otra parte los materiales disueltos en los mares son proporcionalmente escasos, porque el volumen total del agua de los océanos es de 1 370 millones de kilómetros cúbicos.

Cerca de la costa, y principalmente en la desembocadura de los grandes ríos, la composición del agua de mar puede variar un poco, pero lejos de la costa, tanto en la superficie como en las profundidades, la composición es constante y el contenido de elementos se repite con gran exactitud, esto se debe al fenómeno de la difusión, que es favorecido por las corrientes marinas, tanto horizontales como verticales.

El porcentaje de las sales disueltas varía bastante, siendo bajo cerca de la desembocadura de corrientes importantes y en mares fríos como el Báltico, y alto en regiones tropicales y áridas como el Mar Rojo.

En mar abierto la salinidad varía entre 33.6 y 35.8 partes por millar.

En la Tabla I se da la composición de un agua de mar promedio en partes por millón, para una clorinidad de 19.000 y una salinidad de 34.325.

Por definición la salinidad es el contenido total de sólidos, en gramos, por kilogramo de agua de mar, cuando todos los carbonatos se han convertido en óxidos, los bromuros y yoduros sustituidos por cloruros y toda la materia orgánica se ha oxidado completamente.

Clorinidad es el contenido total de cloro en gramos en un kilogramo de agua de mar, después de que todos los bromuros y yoduros se han sustituido por cloruros.

TABLA I  
 CONSTITUYENTES PRINCIPALES DEL AGUA DE MAR (\*)  
 (En partes por millón)

Sodio ( $\text{Na}^+$ )	10 561
6 Magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ )	1 272
Calcio ( $\text{Ca}^{++}$ )	400
Potasio ( $\text{K}^+$ )	380
Cloruros ( $\text{Cl}^-$ )	18 980
Sulfatos ( $\text{SO}_4^{=}$ )	2 649
Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ )	142
Bromuros ( $\text{Br}^-$ )	65
Otros sólidos	34
Total de sólidos disueltos	34 483
Densidad (20°C)	1.0243
Agua (balance)	965 517

(\*) Spiegler K.S. Salt Water Purification New York, 1962

Esta tabla muestra los elementos más importantes, pero en el agua de mar pueden encontrarse prácticamente todos los elementos que existen en la Tierra, aunque en cantidades pequeñísimas como se ve en la siguiente tabla:

TABLA II  
 COMPOSICION DEL AGUA MARINA (\*)  
 (en porcentajes)

Oxígeno	86.82
Hidrógeno	10.72
Cloro	1.89
Sodio	1.056
Magnesio	0.14
Azufre	0.088
Calcio	0.04
Potasio	0.04
Bromo	0.006
Carbono	0.002
Estroncio	0.001
Boro	0.00040
Flúor	0.0001
Silicio	0.00005

TABLA II (Continuación)

-17-

Rubidio	0.00002
Litio	0.000015
Nitrógeno	0.00001
Yodo	0.000005
Fósforo	0.000005
Zinc	0.000005
Bario	0.000005
Hierro	0.000005
Cobre	0.000002
Arsénico	0.0000015
Aluminio	0.0000011
Plomo	0.0000005
Manganeso	0.0000004
Selenio	0.0000004
Níquel	0.0000003
Estafío	0.0000003
Cesio	0.0000002
Uranio	0.0000002
Cobalto	0.0000001
Molibdeno	0.0000001
Germanio	0.0000001
Titanio	0.0000001
Vanadio	0.00000005
Galio	0.00000005
Torio	0.00000004
Cerio	0.00000003
Lantana	0.00000003
Itrio	0.00000003
Bismuto	0.00000002
Escandio	0.000000004
Mercurio	0.000000003
Plata	0.000000004
Oro	0.0000000004
Radio	0.0000000000001

(\*) Fersman A.E. Geoquímica Recreativa Moscú URSS.

Como se ve por la Tabla, los 15 primeros elementos constituyen el 99.99% y los resultantes el 0.01%.

Además de las sales en solución, el agua de mar tiene varios gases disueltos, siendo los más importantes:

Oxígeno	0 a 0.75 mg átomo/litro
Nitrógeno	0.75 a 1.3 mg átomo/litro
CO <sub>2</sub> total	1.5 a 2.5 mg átomo de C/litro
Argón	0.2 a 0.4 mililitros/litro

PROPIEDADES FÍSICAS. En primer lugar deben considerarse las propiedades más importantes del mar y las variaciones que presenta éste.

Densidad. La densidad del agua del mar está dada con relación a la del agua pura a 4°C, que se toma como unidad, y depende de la cantidad de material en solución y de la temperatura.

Se ha determinado una relación empírica entre la clorinidad y la salinidad en el agua de mar, establecida por la Comisión Internacional y que es la siguiente:

$$\text{salinidad} = 0.03 + 1.805 \times \text{clorinidad}$$

expresada en gramos por kilogramo o partes por millar.

Conociendo la salinidad puede calcularse la densidad por medio de la relación:  $S = (D-1) 1000$  Siendo "S" la salinidad y D la densidad a las mismas condiciones de presión y temperatura.

La salinidad depende en parte de la diferencia entre la precipitación y la evaporación y puede calcularse aplicando la fórmula de Würst:

$$S = 34.60 + 0.0175 (E-P)$$

Siendo S la salinidad en partes por millar

E la evaporación en centímetros por año

P la precipitación en centímetros por año.

En la siguiente Tabla tomada de THE OCEANS, de Sverdrup, se indican los valores de la salinidad, evaporación y precipitación en los Océanos Atlántico y Pacífico para latitudes entre las que se encuentra la República Mexicana.

TABLA III  
Océano Atlántico

Latitud	Salinidad	Evaporación	Precipitación
30°N	36.79	121	54
25°N	36.87	140	42
20°N	36.47	149	40
15°N	35.92	145	62

TABLA III (continuación)

-19-

Océano Pacífico

Latitud	Salinidad	Evaporación	Precipitación
30°N	34.77	116	65
25°N	35.00	127	55
20°N	34.88	130	62
15°N	34.67	122	62

Como puede verse la salinidad varía muy poco y la del agua de mar promedio es de 34.325. Esto nos muestra que la densidad también cambia poco ya que están íntimamente relacionadas.

La salinidad varía muy poco con la estación, por ejemplo en mayo la máxima es de 36.7 y la mínima en noviembre de 36.59.

En la siguiente tabla se da la densidad media mensual y la media anual del agua de mar para diferentes localidades de la República Mexicana, basada en observaciones efectuadas en las estaciones de mareógrafos instaladas por el Instituto de Geofísica de UNAM, en cooperación con el Servicio Geodésico Interamericano y la Secretaría de Marina.

Las observaciones se hicieron sacando muestras superficiales del agua de mar a las que se les tomó la temperatura y la densidad con un hidrómetro.

Todas las densidades se redujeron a la temperatura de 15°C para que los datos sean susceptibles de comparación. La densidad del agua pura a esa temperatura es de 0.9991.

Los datos son el promedio de los años 1952 a 1958. Excepto, para Alvarado y Tampico, que es el promedio de 1955 a 1958, y para Topolobampo y Ensenada, de 1956 a 1958. (Ver la Tabla IV).

Temperatura. La temperatura del agua de mar varía principalmente con la latitud, habiéndose obtenido el siguiente valor promedio en la superficie, por Krümmel (The Oceans, Sverdrup H.U. N.J., 1942).

Temperatura en °C

Latitud Norte	Océano Atlántico	Océano Pacífico
0 - 10°	26.66	27.20
10 - 20°	25.21	26.42
20 - 30°	24.16	23.33

La variación diurna de la temperatura en el mar es muy pequeña, siendo de 1.9°C la máxima con calma y cielo claro, dado que aunque recibe una gran radiación durante el día, ésta se pierde en la noche.

TABLA IV  
DENSIDAD Y SALINIDAD DEL AGUA DE MAR

Lugar		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANUAL
ENSENADA ,	D	1.0248	1.0248	1.0249	1.0248	1.0251	1.0251	1.0251	1.0250	1.0251	1.0251	1.0250	1.0250	1.0250
B.C.	S	33.4	33.4	33.6	33.4	33.8	33.8	33.8	33.7	33.8	33.8	33.7	33.7	33.7
La Paz ,	D	1.0269	1.0260	1.0272	1.0272	1.0273	1.0273	1.0273	1.0271	1.0270	1.0269	1.0269	1.0270	1.0271
B.C.	S	36.2	35.0	36.6	36.6	36.7	36.7	36.7	36.4	36.3	36.2	36.2	36.3	36.4
Guaymas ,	D	1.0264	1.0265	1.0268	1.0270	1.0274	1.0278	1.0279	1.0271	1.0263	1.0264	1.0263	1.0264	1.0268
Son.	S	35.5	35.6	36.0	36.3	36.8	37.3	37.5	36.4	35.4	35.5	35.4	35.5	36.0
Topolobampo,	D	1.0269	1.0269	1.0270	1.0274	1.0277	1.0281	1.0281	1.0277	1.0262	1.0253	1.0268	1.0265	1.0271
Sin.	S	36.2	36.2	36.3	36.8	37.2	37.7	37.7	37.2	35.3	34.1	36.0	35.6	36.4
Mazatlán ,	D	1.0261	1.0262	1.0262	1.0263	1.0263	1.0265	1.0259	1.0252	1.0242	1.0254	1.0258	1.0261	1.0258
Sin.	S	35.1	35.3	35.3	35.4	35.4	35.6	34.9	34.0	32.7	34.2	34.7	35.1	34.7
Tampico ,	D	1.0061	1.0063	1.0080	1.0111	1.0101	1.0080	1.0045	1.0039	1.0038	1.0026	1.0048	1.0061	1.0063
Tamps.	S	9.0	9.3	11.5	15.6	14.2	11.5	7.0	6.2	6.0	4.5	7.3	9.0	9.3
Progreso ,	D	1.0273	1.0274	1.0277	1.0280	1.0282	1.0276	1.0272	1.0271	1.0271	1.0268	1.0269	1.0269	1.027
Yuc.	S	36.7	36.8	37.2	37.6	37.9	37.1	36.1	36.4	36.4	36.0	36.2	36.3	36.8

La variación anual de la temperatura en el mar también es baja, siendo de aproximadamente 5°C en ambos océanos, a la latitud de 30°N.

Estos cambios pequeños de temperatura se deben a que el agua tiene un calor específico muy alto, lo que le permite almacenar gran cantidad de calor sin variar mucho su temperatura.

A grandes profundidades la temperatura, que permanece prácticamente constante, es de cerca de 4°C, ya que a esta temperatura corresponde la máxima densidad del agua y porque las radiaciones no penetran a más de 200 metros.

Calor específico. Este varía con la temperatura y la salinidad y para agua de mar de 3.5%, entre 15 y 200°C, es, aproximadamente, 93% del calor específico del agua pura.

A 0°C y al nivel del mar ( una atmósfera de presión), el calor específico varía con la salinidad en la siguiente forma:

Salinidad partes por millar	0	5	10	15	20	25	30	35
Calor específico calorías/gramo °C	1.000	0.982	0.968	0.958	0.951	0.945	0.939	0.932

La variación con la temperatura se indica en la siguiente tabla, para un agua de mar de 34.85 partes por millar y a una atmósfera de presión:

Temperatura °C	-2	0	5	10	15	20
Calor específico calorías/gramo °C	0.942	0.941	0.938	0.935	0.933	0.932

Los datos sobre la relación entre la salinidad y la temperatura con el calor específico provienen de The Oceans de H.U. Sverdrup.

Calor Latente de Evaporación. Es el calor necesario para evaporar la unidad de masa a una temperatura dada. Su valor es prácticamente igual que el del agua pura; varía con la temperatura, disminuyendo, al aumentar ésta, hasta valer cero a la temperatura crítica de 374°C.

El valor del calor latente de evaporación es de 554, 539 y 522 calorías por gramo a 75, 100 y 125 grados centígrados respectivamente.

Punto de fusión. Es menor que el del agua pura, que es de 0°C, dependiendo del contenido total de sales y se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$Dt_f = - 0.05241 Z$$

Siendo  $Z$  = contenido total de sales por kilogramo de agua

$Dt_f$  = abatimiento en el punto de fusión.

Su valor es de  $-1.9^{\circ}\text{C}$  para el agua de mar normal y de  $-3.9^{\circ}\text{C}$  para la concentrada al doble.

Punto de ebullición. Es mayor que el del agua pura a la misma presión, dependiendo también de la cantidad de sales presentes. La ebullición se alcanza cuando la presión de vapor del agua se iguala a la presión atmosférica. La presión de vapor del agua de mar es aproximadamente 1.84% menor que la del agua pura, de modo que para hervir necesita una temperatura ligeramente mayor a la misma presión.

Así, al nivel del mar, a una atmósfera de presión, el agua de mar normal hierve a  $100.53^{\circ}\text{C}$  y la concentrada al doble a  $101.05^{\circ}\text{C}$ .

pH. El agua de mar es muy ligeramente alcalina y tiene un pH que varía entre 7.5 y 8.4, para una densidad de 1.0243 y a  $20^{\circ}\text{C}$ . Esta variación tan pequeña muestra el alto grado de uniformidad de las aguas oceánicas, debida a la rápida difusión de los iones que es favorecida por las corrientes.

Si se parte de las consideraciones sobre la composición química y las propiedades físicas del agua del océano, es posible tratar, con fundamento, de la localización de las plantas de la desalinización del agua del mar.

## CAPITULO IV

### LOCALIZACION DE LAS PLANTAS DE DESALINIZACION

Un estudio a fondo de la posible localización de las plantas desalinizadoras debería referirse a todo el país, pero el presente trabajo se limitará a las zonas costeras y a localidades que no estén muy lejos de las mismas ni separadas por grandes desniveles.

Se basará en la clasificación climática de Koeppen, ya que es la que más concuerda con la vegetación natural y la de uso más comúnmente aceptado.

Las regiones lejanas a las costas no se consideran, puesto que en la actualidad y en un futuro cercano los costos de bombeo harían prohibitiva la producción de agua potable a partir de la del mar para consumo en estas zonas.

Koenig ( Salt Water Purification. Spiegler K.S. New York, 1962) ha hecho estudios comparativos en lo referente a costos para tratar el agua salada o transportar el agua disponible y sus análisis muestran que los costos más importantes para el suministro de agua son:

- a) La amortización del capital y el costo de operación de acueductos y tuberías.
- b) El costo de las cisternas y tanques de almacenamiento para asegurar un gasto constante, a pesar de las fluctuaciones del suministro del agua.
- c) El costo del tratamiento del agua, si este es necesario.
- d) La amortización del capital y el costo de operación de pozos, si el suministro es de aguas subterráneas.

De los estudios realizados para calcular los costos de suministro municipal de agua por medio de tubería y acueductos se ha encontrado que los costos aumentan rápidamente al disminuir la demanda diaria y al aumentar la distancia del agua potable disponible.

Así por ejemplo si la distancia a la fuente de agua es de 160 Km los costos de inversión para el suministro diario de 100 000 m<sup>3</sup> es de cerca de 2 500 pesos por metro cúbico diario y los gastos de operación de 0.75 pesos por metro cúbico, lo cual es menor que los costos presentes para la purificación de agua de mar. En este caso para una ciudad costera es más económico convertir el agua de mar en potable que transportarla desde 160 Km.

Pero si las necesidades son de sólo 1 000 metros cúbicos, para unos 4 000 habitantes, el costo de inversión por metro cúbico diario sube a 13 750 pesos y el de operación a 6.25 pesos.

En las gráficas No 2 y No 3 se muestra la relación entre la inversión por metro cúbico diario y el costo de operación para la producción diaria a diferentes distancias.

Para el transporte de 10 000 m<sup>3</sup> diarios desde 160 Km, el costo de operación es de 2.50 pesos por m<sup>3</sup> y la inversión de 6 250 pesos por metro cúbico diario.

Suponiendo una rentabilidad cero, puesto que es un servicio municipal, y una amortización a 15 años, o sea 6.66% anual, la amortización diaria por m<sup>3</sup> será:

$$\frac{6\ 250 \times 6.66}{365 \times 100} = 1.24 \text{ Pesos por metro cúbico}$$

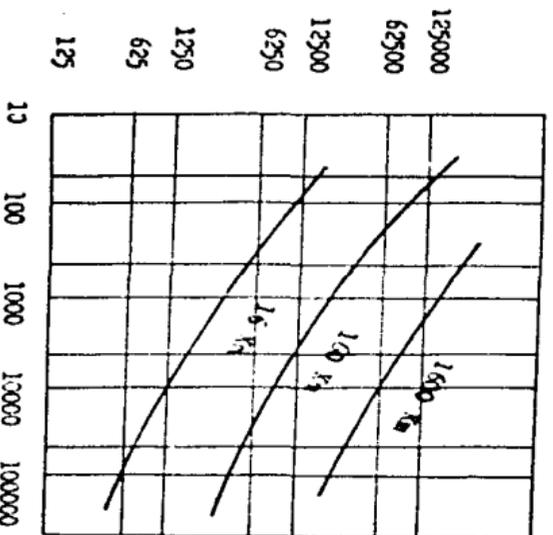
más los 2.50 pesos por operación, da un total de 3.74 pesos por m<sup>3</sup>, lo cual coincide aproximadamente con el costo de purificación de agua de mar actual.

Siguiendo el criterio anterior si se consideran centros de población cuyo consumo sea hasta 10 000 m<sup>3</sup> diarios o sea de 40 000 habitantes, suponiendo un consumo de 250 litros por habitante y por día, y también para poblaciones urbanas menores hasta 200 Km de la costa.

**POBLACIONES URBANAS EN CIMAS SECOS A MENOS DE 200 KM DE LA COSTA**

Población	Municipio	Habitantes en 1960
Baja California		
Tijuana	Tijuana	152 374
Mexicali	Mexicali	174 540
Ensenada	Ensenada	42 561
Tecate	Tecate	6 588
Alberto Cviedo Neta	Mexicali	5 542
Ciudad Morelos	Mexicali	5 281
Jesús Gonzales Ortega	Mexicali	3 332
General Guadalupe		
Victoria	Mexicali	3 250
Mesa de Tijuana	Tijuana	2 926
Zacatecas	Mexicali	2 576
Tabasco	Mexicali	2 555
El Sauzal	Ensenada	2 538

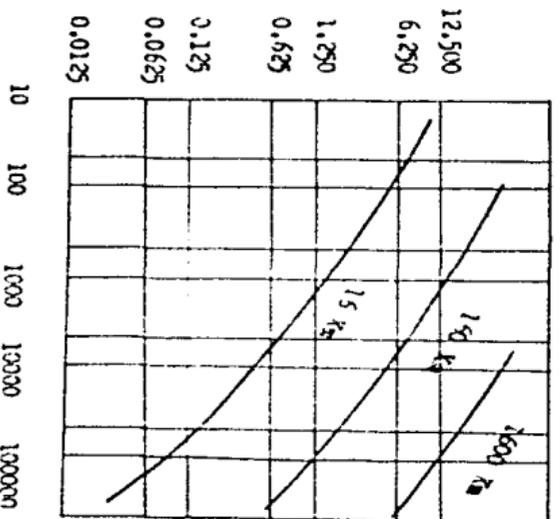
Inversión Pesos/m<sup>3</sup> diario



Producción diaria en metros cúbicos

GRAFICA 2

Costo de Operación Pesos/m<sup>3</sup>



Producción diaria en metros cúbicos

GRAFICA 3

Foblación	Municipio	Habitantes en 1960
<b>Baja California Sur</b>		
La Paz	La Paz	24 253
Santa Rosalia	Mulegé	5 361
<b>Sonora</b>		
Hermosillo	Hermosillo	95 978
Ciudad Obregón	Cajeme	67 956
Guaymas	Guaymas	34 865
Navojoa	Navojoa	30 560
San Luis Rio Colorado	San Luis Rio Colorado	28 545
Empalme	Empalme	18 964
Huatabampo	Huatabampo	10 228
Magdalena	Magdalena	9 445
Heroica Caborca	Caborca	9 338
Esperanza	Cajeme	7 406
Santa Ana	Santa Ana	5 934
Yaqui	Cajeme	5 741
Bacabampo	Etchojoa	4 848
Benjamin Hill	Benjamin Hill	4 392
Sahuaripa	Sahuaripa	4 114
Etchojoa	Etchojoa	4 075
Cocorit	Cajeme	3 819
Alamos	Alamos	3 602
Puerto Peñasco	Puerto Peñasco	3 370
Ures	Ures	3 175
Quechhueca	Cajeme	2 827
San José	Bicám	2 798
La Providencia	Cajeme	2 722
Pótam	Guaymas	2 656
<b>Sinaloa</b>		
Culiacán	Culiacán	85 024
Los Mochis	Ahome	38 307
Guasave	Guasave	17 510
Navolato	Culiacán	9 188
Guamáchil	Mocorito	7 878
General Juan José Rios	Guasave	7 194
Costa Rica	Culiacán	6 649
El Dorado	Culiacán	6 423

Población	Municipio	Habitantes en 1960
San Blas	Del Fuerte	5 637
El Fuerte	Del Fuerte	5 331
Mocorito	Mocorito	4 223
Adolfo Ruiz Cortines	Guasave	3 302
Higuera de Zaragoza	Ahome	3 260
Aguaruto	Culiacán	3 021
Pericos	Mocorito	2 911
Ahome	Ahome	2 905
La Cruz	Elota	2 740

Yucatán

Progreso	Progreso	13 694
Telchac	Telchac	2 695

No se consideran las poblaciones que tienen más de 40 000 habitantes, por las razones antes expuestas, con excepción de Tijuana en donde la Secretaría de Recursos Hidráulicos en cooperación con autoridades de los Estados Unidos proyecta construir una planta para el servicio municipal con una producción de 330 litros por segundo, o sea cerca de 30 000 m<sup>3</sup> diarios, que sería la mayor del mundo y estaría operada por energía atómica, produciendo también energía eléctrica, que en parte se enviaría a los Estados Unidos.

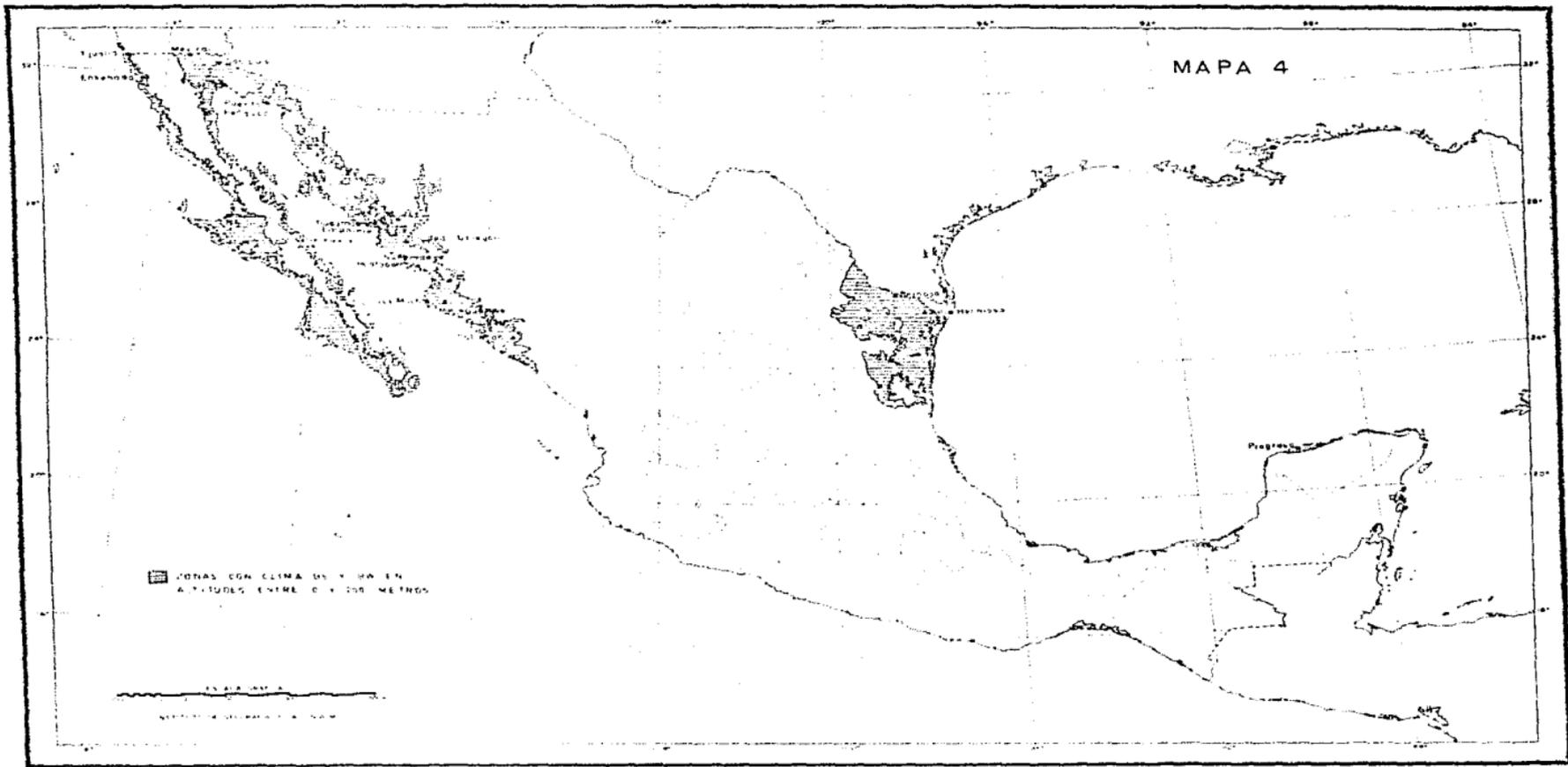
El estudio se limitará a poblaciones con altitudes no mayores de 200 metros, ya que el costo del agua potabilizada aumentará notablemente si se tuviera que elevar a mayores alturas.

En el mapa No 4 se han localizado las poblaciones urbanas más importantes que se encuentran en los climas ES y BW en alturas menores de 200 metros y a no más de 150 kilómetros de la costa.

Con las poblaciones seleccionadas se ha elaborado la siguiente tabla, indicándose el clima, la altitud, la distancia a la costa y la distancia a las corrientes importantes.

En el estudio realizado en dichas tablas no se consideran las poblaciones localizadas a distancias mayores de 150 km de la costa, ni las que estén a más de 200 metros de altura y tampoco las que se encuentran sobre corrientes permanentes con un gasto que pueda satisfacer sus necesidades domésticas o aquellas en las que la distancia a dichos ríos sea menor que a la costa o si es mayor que la diferencia no sea superior a 50 Km.

MAPA 4



ZONAS CON CLIMA SU Y SA EN ALTITUDES ENTRE 0 Y 200 METROS

ES ALA ESCALA

INSTITUTO GEOGRAFICO NACIONAL

Población	Clima	Habitantes en 1960	Altitud en m	Distancia a la costa	Distancia a corrientes importantes
<b>BAJA CALIFORNIA</b>					
Tijuana	BS	152 374	55	7 Km	Junto al rio Tecate
Tecate	BS	6 588	514	47 Km	30 Km de la presa Abelardo Rodríguez
Alberto Oviedo	BW	5 542	menos de 200	70 Km	Cerca del rio Colorado
Cuervos	BW	5 281	menos de 200	74 Km	Cerca del rio Colorado
General Guadalupe Victoria	BW	3 250	menos de 200	48 Km	Cerca del rio Colorado
Gonzalez Ortega	BW	3 332	menos de 200	83 Km	Cerca del rio Colorado
Mesa de Tijuana	BS	2 926		19 Km	Junto al rio Tecate; a 12 Km de la presa Abelardo Rodríguez.
El Sauzal	BS	2 538	al nivel del mar		s.c.p.c, (x)
Ensenada	BS	42 561	13	Costa	s.c.p.c.
Tabasco	BW	2 555	menos de 200	60 Km	Cerca del rio Colorado
Zacatecas	BW	2 576	menos de 200	84 Km	Cerca del rio Colorado
<b>BAJA CALIFORNIA SUR</b>					
La Paz	BW	24 253	10	Costa	s.c.p.c.
Santa Rosalía	BW	5 361	al nivel del mar		s.c.p.c.
<b>SONORA</b>					
Heroica Caborca	BW	9 338	305	77 Km	Orilla del rio Magdalena
Magdalena	BS	9 445	693	176 Km	
Santa Ana	BS	5 934	687	163 Km	
Guaymas	BW	34 865	8	Costa	s.c.p.c.
Empalme	BW	18 964	2	Costa	s.c.p.c.
Esperanza	BW	7 406	menos de 200	52 Km	3 Km del rio Yaqui
Ciudad Irrigación	BW	5 741	menos de 200	27 Km	21 Km del rio Yaqui
Navojoa	BW	30 560	40	36 Km	36 Km de la Presa Mucúzari

Población	Clima	Habitantes en 1960	Altitud en m	Distancia a la costa	Distancia a corrientes importantes
Huatabampo	BW	10 228	20	12 Km	s.o.p.c.
San Luis Rio Colorado	BW	28 545	27	60 Km	Orilla del rio Colorado
Alamos	ES	3 610	410	63 Km	21 Km de la Presa Moodzari
Bacobampo	BW	4 848	menos de 200	23 Km	s.o.p.c.
Benjamín Hill	ES	4 392	menos de 200	143 Km	31 Km del rio Magdalena
Cocorit	BW	3 819	menos de 200	52 Km	2 Km del rio Yaqui
Etohojoa	BW	4 075	39	22 Km	s.o.p.c.
Pótam	BW	2 656	menos de 200	14 Km	2 Km del rio Yaqui
La Providencia	BW	2 722	menos de 200	38 Km	8 Km del rio Yaqui
Puerto Peñasco	BW	3 370	61	Costa	s.o.p.c.
Quechahuaca	BW	2 827	menos de 200	19 Km	32 Km del rio Yaqui
Sahuaripa	BW	4 114	460	186 Km	
San José	BW	2 798		36 Km	6 Km del rio Yaqui
Ures	ES	3 174	432	158 Km	Orilla del rio Sonora

#### SINALOA

General Juan José Rios	BW	7 194	menos de 200	8 Km	20 Km del rio Sinaloa
El Fuerte	ES	5 331	115	51 Km	Orilla del rio Fuerte
San Blas	ES	5 637	37	37 Km	Orilla del rio Fuerte
Los Mochis	BW	38 307	10	11 Km	14 Km del rio Fuerte
Guasave	ES	17 510	menos de 200	24 Km	Junto al rio Sinaloa
Guamúchil	ES	7 878	45	35 Km	Junto al rio Mocorito
Navolato	ES	9 188	12	23 Km	Cerca del rio Culiacán
Costa Rica	ES	6 649	menos de 200	17 Km	26 Km del rio Culiacán
El Dorado	ES	6 423	9	10 Km	Junto al rio San Lorenzo
Aguaruto	ES	3 021	menos de 200	32 Km	Junto al rio Culiacán
Adolfo Ruiz Cortines	ES	3 302	menos de 200	8 Km	15 km del rio Sinaloa
Ahome	BW	2 905	350	25 Km	2 Km del rio Fuerte

Población	Clima	Habitantes en 1960	Altitud en m	Distancia a la costa	Distancia a corrientes importantes
La Cruz	ES	2 740	14	5 Km	Orillas del río Elota
Higuera de Zaragoza	BW	3 260	menos de 200	12 Km	4 Km del río Fuerte
Mocorito	ES	4 223	838	47 Km	Junto al río Mocorito
Pericos	ES	2 911	200	31 Km	31 Km del río Badiraguato
TAMAULIPAS					
Padilla	ES	2 898	153	104 Km	Orilla del río Purificación
San Fernando	ES	3 904	55	25 Km	Orilla del río San Fernando
Valle Hermoso	ES	15 769	menos de 200	27 Km	Cerca del Vaso Palito Blanco
18 de Marzo	ES	7 519	14	32 Km	Cerca del Vaso Palito Blanco
Anáhuac	ES	3 556	menos de 200	36 Km	Cerca del Vaso Palito Blanco
Magüeyes	ES	2 672	menos de 200	36 Km	Cerca del Vaso Palito Blanco
YUCATAN					
Progreso	ES	13 694	8	Costa	s.c.p.c.
Telchac	ES	2 695	10	17 Km	s.c.p.c.

(x) s.c.p.c. Sin corrientes permanentes cercanas

Algunas características de las corrientes mencionadas son las siguientes:

Rio Sinaloa. Tiene un caudal anual promedio de 1 760 millones de  $m^3$ ; en tiempos de seca su gasto baja a  $0.150 m^3/seg$  y su gasto medio es de  $52.8 m^3/seg$ .

Rio Culiacán. Tiene un gasto medio de  $114.3 m^3/seg$  que baja hasta cero en la seca. De su afluente el rio Tamazula se alimenta la presa Sanalona con una capacidad de 500 millones de  $m^3$  y la presa de Humaya de su afluente del mismo nombre.

Rio Mocorito. Tiene un caudal medio de  $4.65 m^3/seg$  que baja hasta nulificarse en la seca.

Rio San Lorenzo. Su escurrimiento promedio es de 1 385 millones de metros cúbicos al año.

Rio Elota. Desaparece prácticamente en el verano.

Rio Fuerte. Tiene un gasto anual de 4 000 millones de  $m^3$  y alimenta la presa Miguel Hidalgo.

Rio Yaqui. Su gasto medio es de  $87.38 m^3/seg$  y alimenta la presa Alvaro Obregón.

Rio Mayo. Alimenta la presa Mocuzari.

Rio Sonora. Termina prácticamente en la presa Abelardo Rodríguez, junto a Hermosillo.

Rio Sonoyta. Es intermitente y no llega hasta el mar.

Rio Colorado. Por el Tratado Internacional de Aguas de 1944, México dispone de 1 850 millones de metros cúbicos anuales.

Rio Tecate. Tiene periodos con cauce seco y crecientes hasta de 2 000 metros cúbicos por segundo.

Rio de las Palmas. Que alimenta la presa Rodríguez que almacena hasta 137 millones de  $m^3$  y abastecía a Tijuana, donde se regaban 1 000 hectáreas, pero se secó en 1961 provocando problemas en el suministro de agua municipal en Tijuana.

Rio Purificación. Es permanente.

Rio San Fernando. Tiene un gasto de  $30.6 m^3/seg$ .

Rio Grande. De donde se deriva el Vaso Falito Blanco.

Por lo anterior, se observa que las poblaciones de Sinaloa y Tamaulipas, quedan en la proximidad de corrientes o presas importantes y aunque en algunos de los rios en tiempo de seca el gasto es nulo, el promedio es considerable y pueden satisfacer sus necesidades almacenando el agua.

En cuanto a Yucatán el problema se ha solucionado tratando el agua de pozos que tienen un contenido de 800 partes por millón, con gran contenido de carbonatos.

La mitad de la población de Yucatán contará desde este año con servicio de agua potable del que carecía al terminarse los pozos, plantas potabilizadoras, redes, tomas y tanques de almacenamiento por 183 millones de pesos, en Mérida, Motul, Progreso, Chelem, Chicxulub, Tizimin, Izamal, Ticul y Valladolid. Los pozos profundos que surtirán al sistema en Mérida se perforaron a 14 kilómetros de la ciudad y la planta potabilizadora tendrá una capacidad total de 1 500 litros por segundo.

De acuerdo con lo anterior las poblaciones que ofrecen mayores perspectivas para la instalación de plantas desalinizadoras de agua de mar son las siguientes:

Baja California

Tijuana  
Mesa de Tijuana  
Ensenada y  
El Sauzal

Baja California Sur

La Paz y  
Santa Rosalía

Sonora

Guaymas  
Empalme  
Huatabampo  
Bacobampo  
Etchojoa y  
Puerto Peñasco.

Si se consideran en Sonora y Baja California las poblaciones de más de 1 000 habitantes que se encuentran en la costa o dentro de un radio de 25 Km de alguna de las anteriores, ya que se eliminaría el transporte en el primer caso o se podría utilizar el agua obtenida en alguna de las poblaciones anteriores aumentando su capacidad en el segundo, se agregan a la lista:

Sonora	Población	Habitantes
	Juparé	1 145
	San Pedro	1 082
	Chucarit	1 263
	Basconcobe	1 481
	Sahuaral	1 004
	Jecopaco	2 333
	La Unión	1 799
	Yávaros	1 092
Baja California		
	El Maneadero	1 181
	El Ciprés	1 345
Baja California Sur		
	Todos Santos	2 040
	San José del Cabo	2 006

El suministro actual de agua potable en las poblaciones seleccionadas es el siguiente:

La Paz. De 4 pozos profundos:

Pozo Colonia Bella Vista	50 l/seg
Pozo 1 (86.4 m)	25 l/seg
Pozo 2 (100 m)	35 l/seg
Pozo 3 (72.5 m)	40 l/seg

Total 150 litros/segundo

San José del Cabo. Dos pozos, uno fuera de uso y el otro deficiente. Proyecto con gasto de 6 litros por segundo.

Todos Santos. Manantial, 30 litros por segundo.

Santa Rosalía. Manantiales de Santa Ageda, a 18 Km de Santa Rosalía, con un gasto de 60 litros por segundo y un pozo a 10 Km con un gasto de 17 litros por segundo.

Tijuana. Acuífero la Misión: 250 l/seg; subalveos del río Tijuana 150 l/seg. Total 400 litros por segundo.

Ensenada. Cinco pozos en las margenes de los arroyos Ensenada y Gallo. 60 litros por segundo.

Bacobampo. Pozos a cielo abierto en las márgenes del río Mayo, particulares. Proyecto de 23 litros por segundo.

Sahuaral. Canal Sahuaral No 2 y pozo de ejido, del que se transporta el agua con cubetas. Proyecto de 8 litros por segundo.

La Unión. No hay servicio de agua potable; sólo existe un anteproyecto.

Guaymas y Empalme.	En San José de Guaymas	Pozo # 5	30 l/seg
		Pozo # 2	14 l/seg
	En Raytorena	Pozo # 1	98 l/seg
	En Valle de Guaymas	Pozo # 5	42 l/seg
		Pozo # 6	98 l/seg.

Puerto Peñasco. El agua la transportan en pipas del pozo Hielo Estrella Azul en el Km 29.5 del camino a Sonoyta. Proyecto de dotación de 34.7 litros por segundo.

Todas las demás poblaciones seleccionadas carecen del servicio de agua potable.

De las poblaciones anteriores carecen de energía eléctrica: El Sauzal, El Maneadero, El Ciprés, Yávaros, San Pedro, Chucarit, Basconco, Sahuaral y La Unión. Se hace mención de esto porque en las plantas desalinizadoras, se puede generar electricidad como un producto secundario.

Las poblaciones anteriores pueden tener un servicio en común, localizándose una planta desalinizadora en la población costera o en la mayor, de la cual se distribuiría el agua a las localidades cercanas; de acuerdo con esto la localización de las plantas y el número de habitantes a los que suministraría agua, sería la siguiente:

Planta	Población	Habitantes	Distancia a la planta
La Paz		24 253	
San José del Cabo		2 006	
Todos Santos		2 040	
Santa Rosalía		5 361	
Ensenada		42 561	
	El Sauzal	2 538	4 Km
	El Maneadero	1 181	14 Km
	El Ciprés	1 345	4 Km
		<hr/> 47 625	47 625

Planta	Población	Habitantes	Distancia a la planta
Tijuana		152 374	
	Mesa de Tijuana	2 926	
Yavaros		<u>155 300</u>	155 300
		1 092	
	Huatabampo	10 228	18 Km
	Etchojoa	4 075	25 Km
	Juparé	1 145	15 Km
	San Pedro	1 082	37 Km
	Chucarit	1 263	34 Km
	Basconcobe	1 481	29 Km
	Sahuaral	1 004	27 Km
	Bacobampo	4 848	32 Km
Guaymas	Jecopaco	2 333	33 Km
	La Unión	1 799	17 Km
		<u>30 350</u>	30 350
		34 865	
	Empalme	18 964	7 Km
Puerto Peñasco		<u>53 829</u>	53 829
		3 370	

Para estas plantas se ha elaborado la siguiente tabla, en la que se calcula la población para 1966 suponiendo que esta crece con el mismo ritmo que la de toda la República, con la siguiente ecuación:

$$\text{Habitantes}_{1966} = \text{Habitantes}_{1960} \times \frac{42\ 663\ 351}{34\ 923\ 129}$$

o sea:

$$\text{Habitantes}_{1966} = \text{Habitantes}_{1960} \times 1.22$$

Por datos obtenidos en la Secretaría de Recursos Hidráulicos, se sabe que la dotación de agua, incluyendo consumo doméstico, consumo industrial y comercial, consumo público y pérdidas y desperdicios es como sigue: Poblaciones Rurales (menos de 2 500 habitantes)

150 litros/habitante x día	clima templado
100 litros/habitante x día	clima frío

**Población Urbana**

200 litros/habitante x día	clima frío
250-300 litros/habitante x día	clima templado
300-400 litros/habitante x día	clima cálido

Alfred Loehberg, experto de la UNESCO da los siguientes datos para el promedio mundial:

Uso doméstico e industrial	600 litros/hab.día	200 m <sup>3</sup> /hab. año
Agricultura, cosecha en 500 m <sup>2</sup>	1 200 l/hab.día	400 m <sup>3</sup> /hab. año
Total	1 800 litros/hab. día	600 m <sup>3</sup> /hab. año

En la tabla se calcula el agua potable necesaria con el dato mínimo que considera la Secretaría de Recursos Hidráulicos para poblaciones urbanas de clima cálido o sea 300 litros/habitante x día.

Con la población estimada según la curva, se calcula el agua necesaria para 1980.

$$\text{Agua Necesaria}_{1980} = \text{Agua Necesaria}_{1966} \times \frac{58\ 401\ 199}{42\ 663\ 351}$$

$$\text{Agua Necesaria}_{1980} = \text{Agua Necesaria}_{1966} \times 1.60$$

El agua disponible basada en datos de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, se calcula multiplicando el gasto en litros por segundo por 86 400 segundos por día y se divide entre mil para calcularla en metros cúbicos diarios.

Restando el agua disponible al agua potable necesaria en 1980 se calcula el déficit de agua para 1980. Esta cifra aproximada es la capacidad de la planta en la actualidad, ya que debe ser calculada para necesidades futuras.

En la misma tabla se observa que actualmente carecen de agua potable las poblaciones del grupo de Yavaros y Puerto Peñasco y es deficiente en Ensenada y Tijuana.

Extrapolando las necesidades para 1980, de acuerdo con el mismo ritmo de aumento de población que en la República Mexicana, sin considerar que al mejorar el nivel de vida el consumo de agua per capita aumenta, resulta que para dicho año el agua disponible será deficiente también en La Paz, Guaymas y Tepic.

Hasta ahora se han considerado poblaciones de más de 1000 habitantes y que carecen de agua potable, pero la mayoría de las localidades con menos de 1000 habitantes no disponen de agua potable y en estos

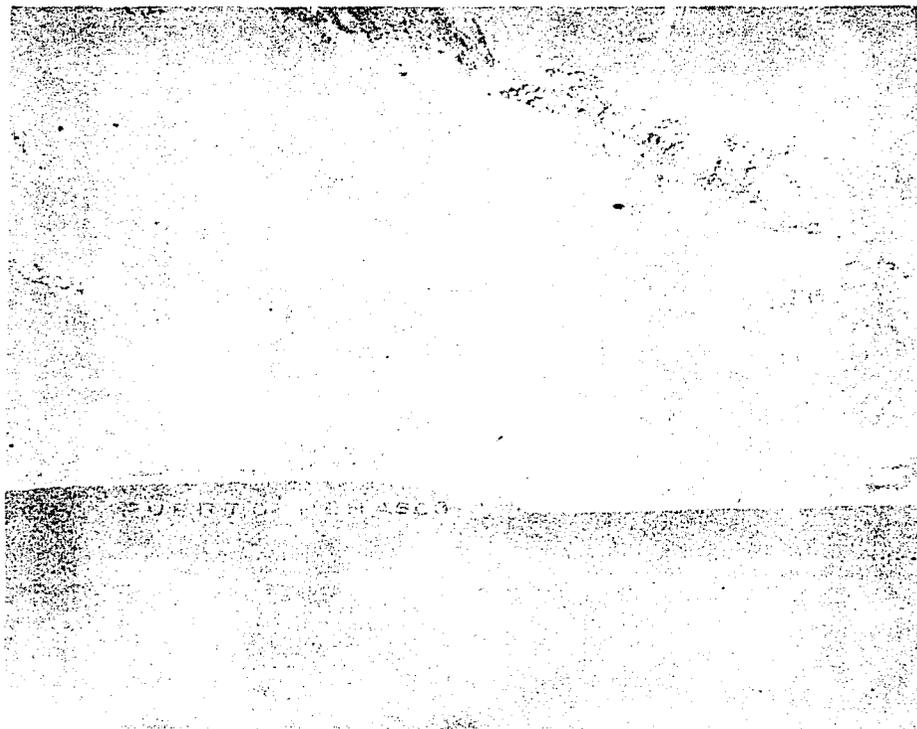
lugares se podrían instalar pequeñas plantas para uso doméstico local, sólo en poblaciones costeras ya que el bombeo de volúmenes pequeños de agua no sería costoso; según el número de habitantes se recomienda posteriormente el uso de diferentes métodos.

Según el estudio se instalarían 7 plantas con una capacidad de 113 700 m<sup>3</sup> diarios que servirían para satisfacer las necesidades de:

$$\frac{113\ 700\ 000\ \text{litros/día}}{300\ \text{litros/habitante} \times \text{día}} = 379\ 000\ \text{habitantes}$$

En los planos No 1 y No 2 se muestra la red de distribución propuesta para el agua potabilizada en las plantas de Insensada y Yavaros.



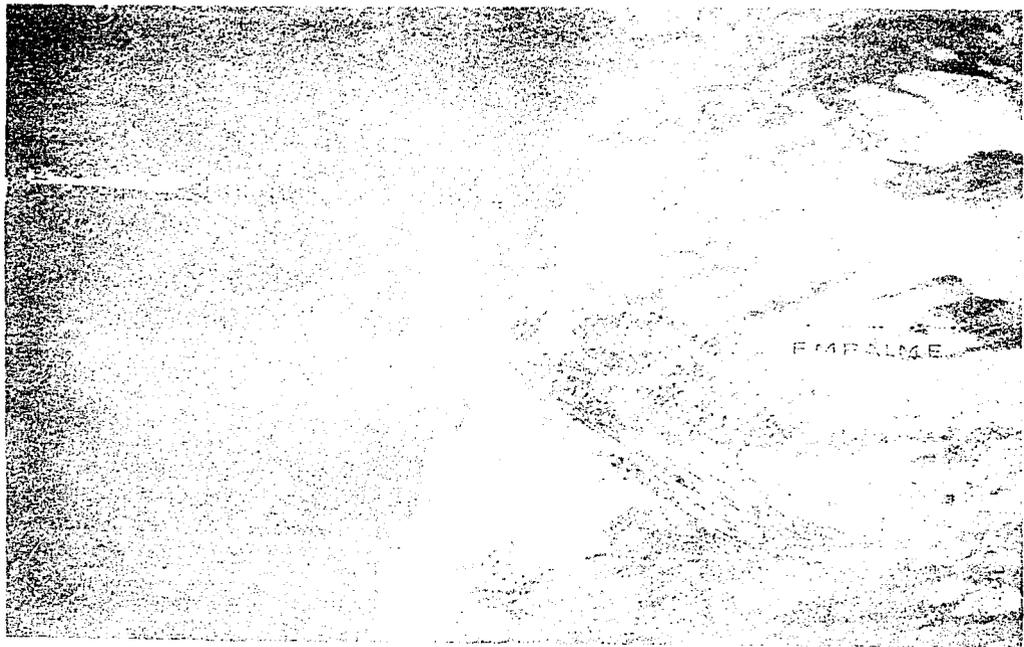


INSTITUTO DE GEOGRAFIA



Figure 1. Quarry face at Quaymas.

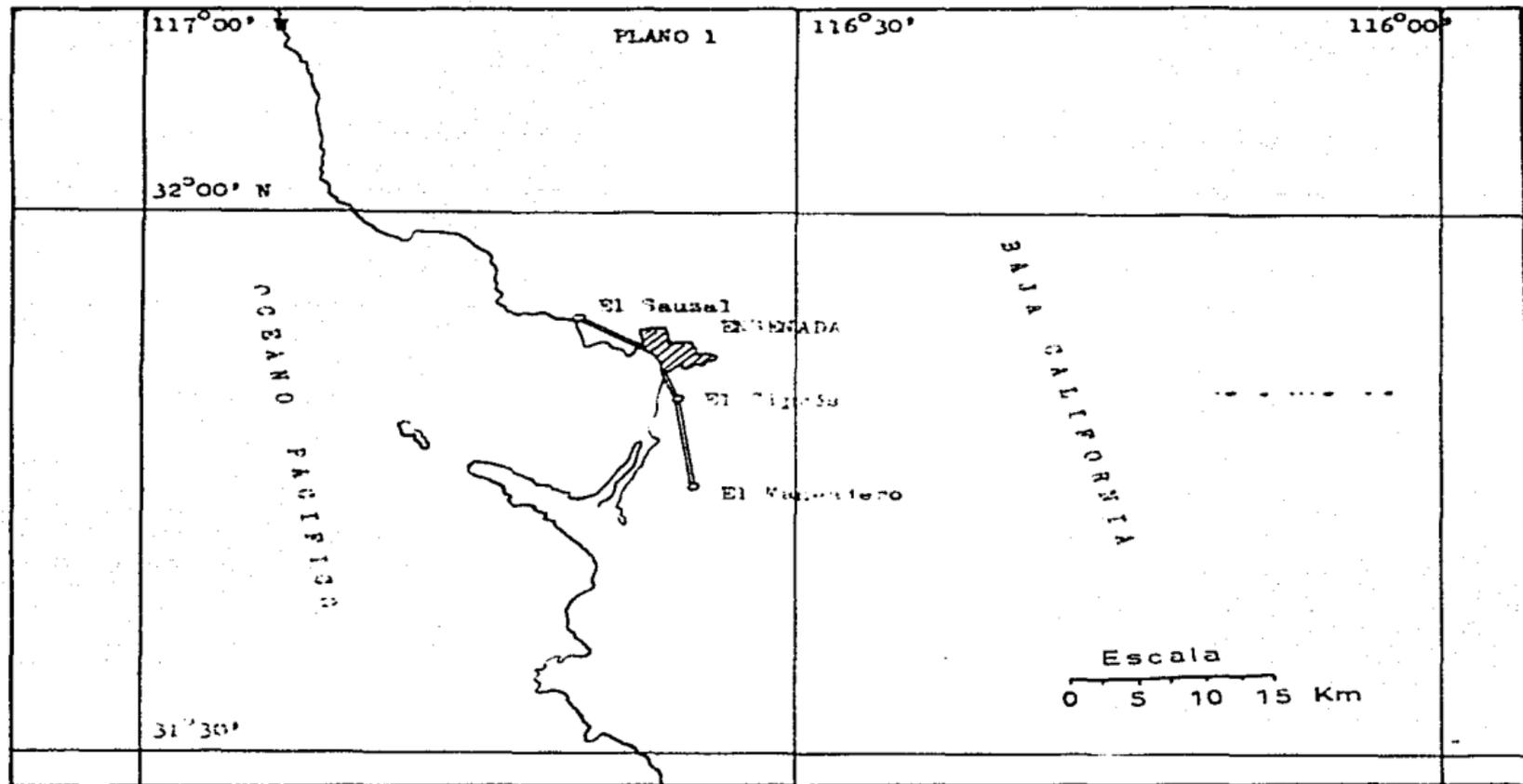


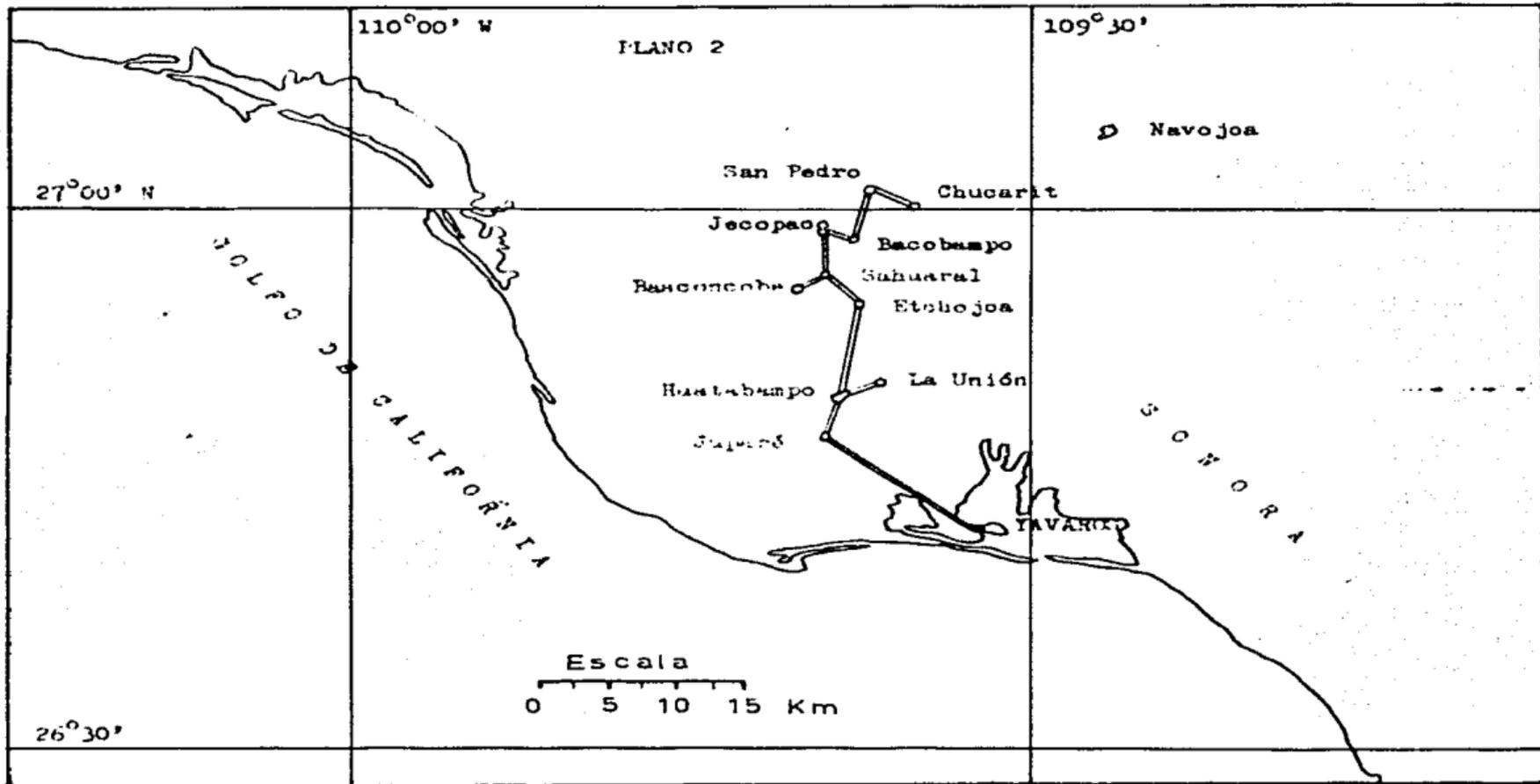


EMERGENCY

LA PAZ

San Luisito





CAPITULO V  
METODOS Y COSTOS DE DESALINIZACION

A continuación se van a describir diversos métodos para desalinizar el agua de mar indicando los costos correspondientes.

Evaporación Solar. La cantidad de radiación solar que recibe un lugar determinado depende de la latitud, la fecha, la hora, la nubosidad, la altitud y la transparencia de la atmósfera.

El 21 de marzo y el 22 de septiembre la duración del día y de la noche es la misma en todas partes. Entre el 21 de marzo y el 22 de septiembre, los días son más largos en el hemisferio septentrional y del 22 de septiembre al 21 de marzo son más cortos. Lo contrario sucede en el hemisferio meridional.

La radiación recibida por una superficie horizontal está dada por la fórmula:

$$I'' = I (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H)$$

donde

I es la radiación recibida normalmente

I'' la radiación recibida en la superficie horizontal.

$\phi$  la latitud

$\delta$  la declinación

H el ángulo horario

Esta fórmula es por unidad de tiempo, en el intervalo dt será:

$$I'' = I (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H) dt$$

Tomando la hora como unidad de tiempo se tiene:  $t v = H$   
v = velocidad angular de la tierra por hora =  $\pi/12$

$$I'' = \left( \frac{I}{v} \right) (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H) dH$$

Integrando entre la salida y puesta del sol se obtiene:

$$I'' = 2 \frac{I}{v} (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin H)$$

y en los equinoccios y a la latitud de  $0^\circ$  se tiene:

$$I''_i = 2 I/v$$

y adoptando esta radiación como unidad tenemos la siguiente tabla:

## Radiación Solar a Diferentes Latitudes

FECHA	L A T I T U D					
	0°	20°	40°	60°	90°	-90°
20 de mar	1.000	0.940	0.766	0.500	0.000	0.000
21 de jun	0.882	1.044	1.107	1.093	1.201	0.000
22 de sep	0.987	0.927	0.756	0.494	0.000	0.000
21 de dic	0.941	0.676	0.357	0.056	0.000	1.283

Para obtener la radiación en cualquier fecha se busca en las efemérides del año la declinación del sol y se calcula el ángulo horario H con la fórmula:

$$\cos H = -\tan \text{ lat} \tan \text{ dec} \quad (\text{para latitudes menores de } 66^{\circ}33')$$

En México no hay estaciones que registren la radiación solar y sólo se tienen datos de:

	Promedio Anual	Máximo	Mínimo
Ciudad Universitaria (México, D.F.)	378	465	229
Veracruz	502	613	325

Todos los valores son dados en calorías por centímetro cuadrado y por día. (Datos del Instituto de Ciencia Aplicada, de la UNAM).

Se disponen datos de localidades de otros países en que se han hecho estudios como se indica en la siguiente tabla:

Lugar	RADIACION RECIBIDA POR UNA SUPERFICIE HORIZONTAL		
	Btu/ft <sup>2</sup> día	cal/cm <sup>2</sup> día	Límina evaporada en cm/día (50% de eficiencia)
	Variación	Promedio anual	
El Paso, Texas	1200-2730	2030	0.485
Tamamassit, Arge- lia	1460-2400	2000	0.477
Poona, India	1430-2690	1980	0.473
Phoenix, Arizona	1061-2710	1925	0.460
Messina, Sudafrí- ca	1340-2320	1875	0.477
Niza, Francia	571-2525	1500	0.358
Salt Lake City	443-2192	1442	0.345
Boston, Mass.	502-1938	1240	0.296
Londres, Inglaterra	181-1740	882	0.210
Antartida	0-735		

Las variaciones se refieren al promedio diario de los meses en que hay mayor y menor radiación. Para la misma evaporada se ha tomado como calor de evaporación 570 calorías por gramo, correspondiendo al agua a 25°C.

La zona que estamos considerando tiene latitudes entre los 23° (San José del Cabo) y 32°31' (Tijuana) y son de clima BS ó BW. Por la falta de datos se considera que la radiación solar es igual que la de El Paso, Texas, o sea 550 cal/cm<sup>2</sup> día, como promedio anual, ya que tiene el mismo clima BW y una latitud semejante ( 31°47' N).

En un metro cuadrado la radiación solar recibida sería: 100x100x550 o sea 5 500 000 cal/m<sup>2</sup> día, y el calor de evaporación del agua a 25°C es de 570 000 calorías por litro y considerando una eficiencia de 50% se podrían obtener:

$$\frac{5\ 500\ 000\ \text{cal/m}^2\ \text{día}}{570\ 000\ \text{cal/litro}} \times 0.5 = 4.8\ \text{litros/m}^2\ \text{día}$$

Considerando un consumo de 200 litros por persona se necesitaría:

$$\frac{200\ \text{litros/persona día}}{4.8\ \text{litros/m}^2\ \text{día}} = 41.7\ \text{m}^2/\text{persona}$$

Y para una población costera de 1 000 habitantes se necesitarían evaporadores con un área de 41 700 m<sup>2</sup> ó sea 4.17 hectáreas, lo cuál representa una instalación enorme con el consiguiente costo elevado. Por lo que respecta a este método, sólo sería aconsejable para poblaciones costeras muy pequeñas en las que se podría instalar un evaporador en cada casa y sería factible y aconsejable para obtener agua para beber ya que para una casa con cinco personas se necesitarían:  $\frac{5}{2} \times 2\ \text{litros} = 10$  litros que se podrían obtener con un evaporador de 2 m<sup>2</sup>.

El costo para instalar evaporadores solares en 1957, con base de concreto y cubierta de vidrio, era de alrededor de 940 pesos por metro cuadrado.

El tipo de evaporador que se podría instalar se muestra en la figura No 2, el cuál consta de un recipiente con el fondo pintado de negro para absorber la mayor cantidad de calor posible, cubierto con una superficie de vidrio liso con cierta pendiente en donde se condensa el agua evaporada y desliza a la parte inferior donde se le colecta. La cantidad de agua evaporada depende principalmente de la radiación solar recibida. Esta cantidad de calor se puede aumentar concentrandola con lentes o espejos parabólicos, pero esto eleva el costo notoriamente.



Figura 2

Diagrama de un Evaporador Solar.

SALT WATER PURIFICATION FIG. 72

La energía solar es gratis, pero los costos de instalación de los evaporadores solares son altos, ya que requieren áreas muy grandes.

La cantidad de energía solar se puede representar en forma gráfica con los piroheliómetros que consisten básicamente en dos tiras de metal una blanca y otra negra; esto origina una diferencia de temperatura que se traduce en una diferencia de potencial que puede medirse.

En las cifras de la tabla de la radiación solar recibida en diferentes lugares, se incluye toda la radiación solar que comprende:

a) La visible, a la que le corresponde poco menos del 40% y abarca el espectro de longitudes de onda de 4000 a 7000 angstroms.

b) La ultravioleta que tiene como máximo un 5% y depende en gran parte de la humedad atmosférica, ya que el vapor de agua absorbe esta radiación. Es la que tiene longitudes de onda menores de 4000 angstroms.

c) La infrarroja que aunque es invisible le corresponde de 55 a 60% y es la que tiene longitudes de onda mayores de 8000 angstroms.

En la misma tabla, se observa que operando con una eficiencia de 50% la evaporación obtenida por día es de alrededor de medio centímetro en las localidades en que la radiación solar recibida es mayor, lo cuál indica que al año se obtendrían:

$$365 \frac{\text{días}}{\text{año}} \times 0.5 \frac{\text{cm}}{\text{día}} = 182.5 \text{ cm/año} = 1.825 \text{ mm/año}$$

de esto resulta que si el agua se utilizara para la irrigación, las necesidades de ésta fueran de 600 mm anuales, sólo podría regarse un área tres veces mayor que el área del evaporador, lo cuál muestra claramente la incoasteabilidad de utilizar el agua de mar obtenida por evaporadores solares en la irrigación.

Eficiencia. Las pérdidas de la energía solar dependen de:

a) Condiciones meteorológicas

1. Irrradiación.
2. Temperatura del aire.
3. Velocidad del viento.

b) Del diseño del evaporador.

Las primeras no pueden ser cambiadas, pero las segundas dependen de la naturaleza de los materiales usados, la forma y orientación del evaporador, y de la profundidad de la capa que se esta evaporando; cuando esta es delgada se calienta rápidamente, pero también se enfría pronto en la noche. Si es gruesa, por ejemplo 30 cm, tarda en calentarse,

pero la destilación continúa durante una parte de la noche.

Se han hecho estudios hipotéticos con relación a esto en San Diego California (33°N), para grandes evaporadores solares, suponiendo que el agua se concentra al doble (7%), que el concentrado absorbe el 95% de la radiación que atraviesa la cubierta y el evaporador está directamente sobre el suelo sin aislamiento térmico. Las pérdidas por radiación se calculan con la ley de Stefans:  $E = T^4$

El resultado de estas investigaciones se resumen en las gráficas de la figura No 3.

Pueden calcularse estas predicciones teóricas hechas por Lsf G.O. con las obtenidas experimentalmente en octubre de 1959 en Fort Orange, Florida (29°N).

#### BALANCE DE ENERGIA DE UN EVAPORADOR SOLAR

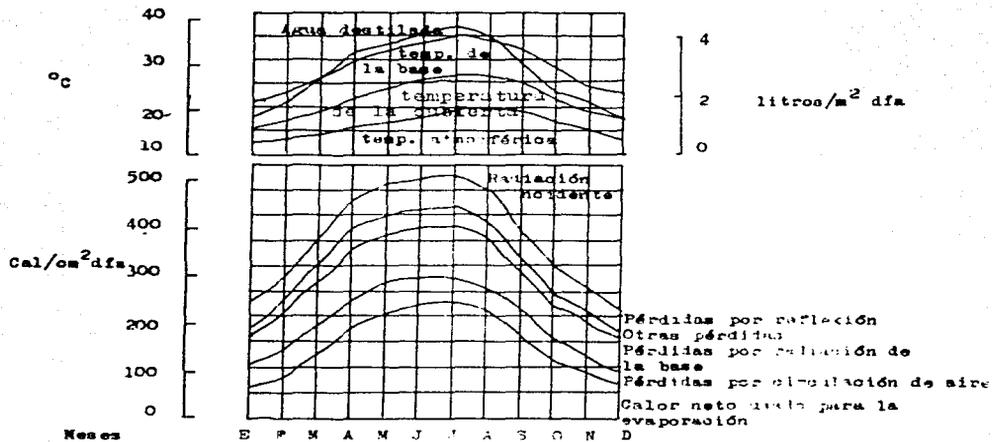
Energía	Por ciento de la radiación solar.
Evaporación	32
Pérdida de calor al suelo	2
Radiación solar reflejada por el evaporador	12
Radiación solar absorbida por la cubierta y la película que se condensa	10
Radiación del agua en el estanque	25
Convección interna (pérdidas por circulación del aire)	7
Pérdidas no contadas, probablemente reevaporación del destilado.	12
	<hr/>
	100%

Experimentalmente se ha encontrado que el factor climatológico decisivo en el rendimiento es la radiación solar promedio, y los otros factores tienen un papel secundario. Como lo ilustra la gráfica de la figura No 4 en la que se presenta el rendimiento diario contra la radiación solar para dos localidades separadas y diferentes evaporadores solares.

Se ha estudiado la posibilidad de sustituir las cubiertas de vidrio por las de plástico que son más económicas, pero de menor rendimiento porque el agua no fluye en forma de película delgada sino que se forman pequeñas gotas de agua que en ocasiones caen en el concentrado.

La producción por unidad de área se puede aumentar utilizando evaporadores solares de varios efectos en los que el calor de condensación no se pierde de la cubierta de vidrio a la atmósfera, sino que se utiliza

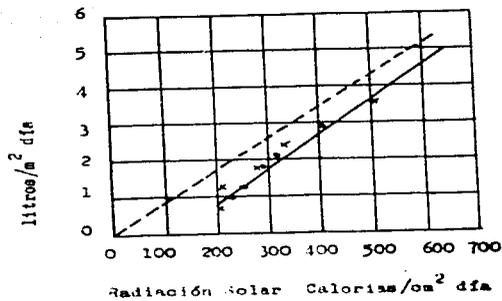
FIGURA # 3



Comportamiento Estimado de un Evaporador Solar  
en San Diego California.

FIGURA 4

Rendimiento de Evaporadores Solares



• Port Orange, Florida, 1959

x Melbourne, Australia, 1956-57

La línea punteada muestra el rendimiento hipotético con 50 por ciento de eficiencia.

para evaporar más agua. Esto se está experimentando y se han construido evaporadores solares de tres efectos en los que se puede obtener 1.9 veces más agua que en uno de un sólo efecto.

Usando espejos parabólicos se podría concentrar más la energía solar, obteniendo temperaturas mayores y pudiéndose utilizar más efectos, pero esto hace los costos prohibitivos.

Los costos del equipo para evaporadores solares son muy grandes, para una planta piloto de 454 m<sup>2</sup> de concreto y cubierta con vidrio, los costos de construcción estimados para 1957 eran de 75 dólares por m<sup>2</sup>, de los cuales 32 eran para el evaporador y el resto para las construcciones adicionales. Suponiendo una producción promedio de 3.3 litros por metro cuadrado por día, le corresponde una inversión de 23 dólares por litro diario de agua destilada. Considerando que el costo de la energía y la mano de obra fuera cero y se tuviera que amortizar en 20 años.

El costo por m<sup>3</sup> de agua potabilizada sería:

$$\begin{aligned} \text{Inversión por 1000 l/diarios: } & 23\ 000 \times 12.50 = 287\ 500 \text{ pesos} \\ \text{Amortización diaria por m}^3 & = \text{costo de producción por m}^3 \\ & = \frac{287\ 500}{365 \times 20} = 39.5 \text{ pesos} \end{aligned}$$

Los costos se pueden disminuir en un porcentaje considerable utilizando cubiertas de plástico en vez de las de vidrio.

Planta Piloto Desalinizadora de Puerto Peñasco, Sonora. Ha sido construido por el Laboratorio de Investigación de Energía Solar de la Universidad de Arizona y el Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora.

Opera con el sistema de múltiple efecto, cerca de Puerto Peñasco, donde hay gran cantidad de radiación solar y se necesita agua potable.

Los colectores solares son de lámina de plástico infladas, de 91 metros de longitud en el centro del área. Tiene además un evaporador circular y un condensador de 15.2 metros de altura cada uno.

El agua salada se toma de un pozo en tajo abierto. Y hay dos depósitos de agua salada bajo tierra y aislados térmicamente.

Los colectores de energía solar son de lámina de plástico negro cubiertos con dos pulgadas de agua ( 5 cm) y cubiertos con una lámina de plástico transparente para evitar la evaporación y con una segunda

Lámina inflada sobre la primera para reducir las pérdidas de energía por radiación y convección.

El agua tarda una hora en fluir de un extremo al otro y se pasa después a un evaporador de torre empacada con anillos de plástico (para aumentar la superficie de contacto) por donde fluye el agua caliente y el aire en sentido contrario.

El condensador es de tubos metálicos con aletas radiales. El agua de mar fría circula por los tubos interiores y el vapor de la corriente de aire humedecido se condensa en el exterior.

El funcionamiento promedio anual es el siguiente: el agua de mar calentada en los colectores solares a  $66^{\circ}\text{C}$  es bombeada a la parte superior de la torre de evaporación, donde el 8% se evapora y el agua salada se enfría a  $21^{\circ}\text{C}$  y se descarga al mar. La corriente de aire saturada se hace circular del evaporador al condensador donde se condensan los vapores, el agua condensada cae al fondo y se recoge como producto.

El agua de mar, a su entrada por el condensador, se calienta de  $16^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$  por el calor de vaporización del agua producto. En los colectores se calienta  $5.6^{\circ}\text{C}$  y se enfría  $45^{\circ}\text{C}$  en el evaporador, por lo que equivale a una planta de múltiple efecto de  $45/5.6 = 8$  efectos.

Como el sol brilla sólo durante el día, se almacena el agua caliente durante la noche para no perder el calor ganado.

Se ha estimado que debe producir 12 000 litros diarios y como máximo 32 000 litros en el verano.

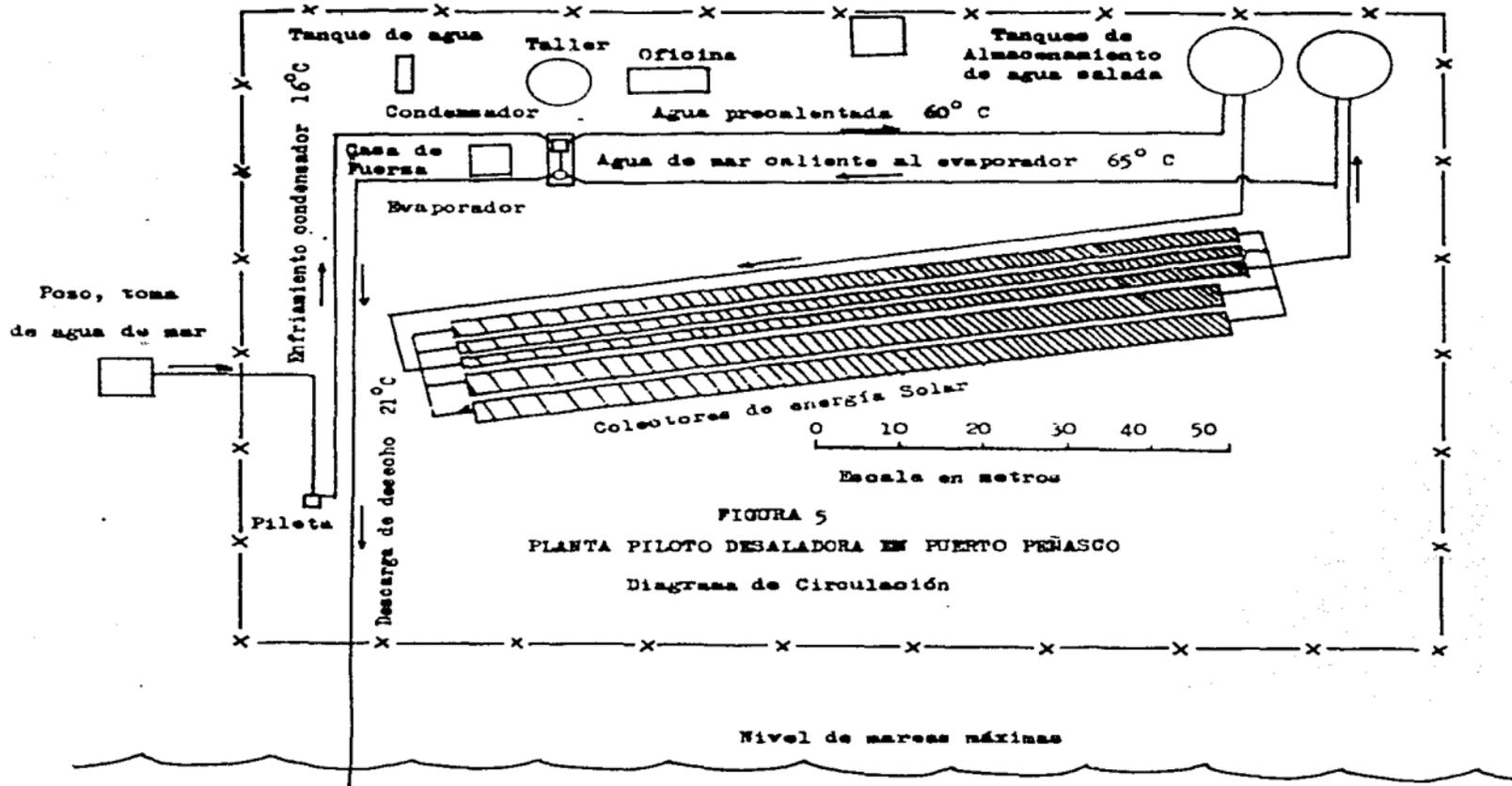
El costo del agua producida fluctua entre 1.56 y 3.13 pesos por metro cúbico.

La superficie de los colectores es de  $1\ 234\ \text{m}^2$  o sea que cada metro cuadrado produce como promedio 12 000 litros/ $1\ 234\ \text{m}^2 = 9.7$  litros por metro cuadrado.

O sea, aproximadamente, 3 veces más que un evaporador solar sencillo (un sólo efecto), en el que se considera que produce aproximadamente 3.3 litros por metro cuadrado.

En la figura No 5 se tiene la representación diagramática del proceso.

Los Metodos de Destilación. Se basan en el principio de que en una solución sólo los gases disueltos y el agua son volátiles, mientras que las sales no lo son.



El 95% de la purificación de las aguas saladas en el mundo se hace por los diferentes métodos de destilación.

El principio de la destilación se basa en que al calentar el agua de mar con vapor en una tubería, éste cede su calor condensándose, el cuál es aprovechado por el agua para aumentar su temperatura y evaporarse. Este vapor se enfría con agua que circula en tubos, se condensa y se recoge como producto libre de sales. La solución concentrada en el evaporador es continuamente desechada.

La temperatura de ebullición del agua es un factor importante, ya que el vapor que se utilice debe tener una presión tal que condense a una temperatura mayor que el punto de ebullición del agua de mar para que se efectúe la transmisión de calor.

En la gráfica de la figura No 5 se tienen la presión de vapor del agua pura y la del agua de mar contra la temperatura. Esta gráfica indica a qué temperatura hervirá el agua, dependiendo de la presión a que esté sometida; así por ejemplo a nivel del mar la presión es de una atmósfera y el agua de mar hierve a  $100.53^{\circ}\text{C}$  y en la Ciudad de México donde la presión es de 586 mm de mercurio o sea  $586/760 = 0.77$  atmósferas, el agua de mar hierve aproximadamente a  $93^{\circ}\text{C}$ .

La presión de vapor del agua de mar es aproximadamente 1.84% menor que la del agua pura por lo que requiere una temperatura ligeramente mayor para hervir.

Se puede utilizar diferentes medios para calentar el agua de mar, como calentadores eléctricos, o a flama directa, pero se ha encontrado que la manera más práctica y económica es utilizando vapor de agua, ya que se puede controlar su temperatura, variando la presión, tiene el mayor calor latente de todas las sustancias y no ocasiona incrustaciones ni corrosiones.

El calor latente de evaporación del agua de mar a  $100^{\circ}\text{C}$  es de 539 calorías por gramo y el calor específico de  $0.954$  calorías/g  $^{\circ}\text{C}$  a  $23^{\circ}\text{C}$  y de  $0.92$  cal/g  $^{\circ}\text{C}$  para la concentrada al doble.

La fuente de calor que se utilice para desalinizar el agua de mar depende del calor de combustión de éste y de su precio puesto en el lugar en que se necesita. Es de esperarse que para cantidades muy grandes de calor, en un futuro cercano, sea la energía atómica la que lo suministre a más bajo precio.

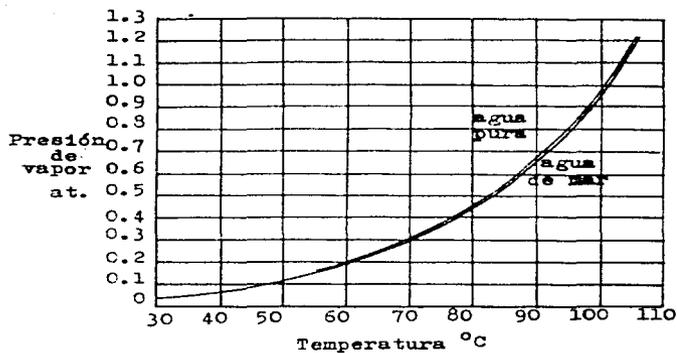


FIGURA 6

Aumento de la Presión de Vapor con la Temperatura

SALT WATER PURIFICATION pag. 37

En la siguiente tabla se dan los calores de combustión de varios combustibles y las cantidades necesarias para evaporar un metro cúbico de agua:

CALOR DE COMBUSTION DE VARIOS COMBUSTIBLES

Combustible	Calor de Combustión		Cantidad de combustible necesaria para evaporar 1 m <sup>3</sup> de agua a 100°C
	cal/gramo	Btu/libra	
Aceite combustible	10 600	19 000	51 Kg
Carbón bituminoso	6 700	12 000	81 Kg
Leña (pino blanco)	4 400	7 900	123 Kg
Metano	13 300	23 950	40.6 Kg ó 61 m <sup>3</sup>
Energía eléctrica	360 kcal/kwhr		625 kwh

Esto es considerando que todo el calor se utiliza para evaporar el agua, aunque en realidad el calor aprovechable es mucho menor ya que hay pérdidas, (un 20% es común).

En estas tablas se observa que la cantidad de combustible necesaria para obtener una tonelada de agua pura es muy grande (81 kg de carbón, por ejemplo) y esto, considerando que no hay pérdidas de calor. Esto se debe a que en la evaporación simple, todo el calor del vapor se desperdicia; los métodos de evaporación de múltiple efecto, evaporación instantánea y destilación por compresión, se basan en utilizar el calor latente del vapor obtenido por ebullición del agua de mar, lograndose así, obtener una tonelada de agua potable a partir de unos pocos kilogramos de combustible.

El método de destilación simple sólo se utiliza para obtener pequeñas cantidades de agua destilada y en plantas marinas que producen hasta 50 toneladas diarias.

Múltiple efecto. Se basa en el hecho de que el calor latente del vapor de un efecto se puede aprovechar para evaporar el agua del siguiente efecto a una presión ligeramente menor. Y el vapor de este segundo efecto hace hervir el agua de un tercero a una presión aún menor y así sucesivamente.

El agua de mar alimentada se calienta previamente con el calor latente del vapor del último efecto. Esto hace posible producir más de una tonelada de agua destilada por tonelada de vapor y aumenta en proporción directa al número de efectos; así experimentalmente se ha encontrado que al aumentar el número de efectos en 1, 2, 3, 4 y 5 las toneladas de agua para producirla por tonelada de vapor es: 0.9, 1.75, 2.5,

### 3.2 y 4, respectivamente.

En principio el número de efectos posibles es muy grande porque los aumentos en los puntos de ebullición (por ir aumentando la concentración de sales en el agua de mar) es muy pequeño, pero en la práctica se necesitan diferencias de temperatura mayores que 0.7°C por efecto para que el calor se transmita a una velocidad razonable.

El número óptimo de efectos se calcula considerando el costo de operación y las cargas fijas. El problema se ha explorado matemáticamente y se ha encontrado que los costos mínimos se obtienen entre 10 y 17 efectos.

Sin embargo las plantas existentes tienen de 3 a 5 efectos porque se encuentran en lugares donde el combustible es muy barato y el de los materiales de construcción alto.

Estas plantas son: Aruba (en las Antillas Holandesas) que produce 12 000 toneladas diarias, Kuwait ( 10 000), Nassau, Bahamas ( 4 500) y Curazao ( 4000). Todas con 3 efectos excepto la de Aruba con 6.

En los Estados Unidos se ha instalado una planta de este tipo en Freeport, Texas, de 12 efectos y en la que se han hecho muchos estudios. Las características de esta planta se resumen en la siguiente tabla:

#### DATOS DE OPERACION DE LA PLANTA DE FREEPORT, TEXAS (x)

Capacidad	4 000 m <sup>3</sup> /día
Tipo	Tubos largos verticales
Flujo del agua de mar	Corriente paralela
Temperatura de los efectos 1 y 12	121 y 49°C
Porcentaje de agua evaporada	70-75%
Vapor por tonelada de agua producida	100 Kg
Inversión por m <sup>3</sup> de capacidad diaria	3 440 pesos
Costo por metr <sup>3</sup> cúbico de agua	3.30 pesos aproximadamente

Este es el proceso más antiguo y también con el que se produce la mayor cantidad de agua potable a partir de la del mar, actualmente, tanto en las instalaciones mencionadas como en los barcos.

El principio de este método se ha esquematizado en la figura No 7.

Se han hecho estudios extrapolando la capacidad de la planta y el número de efectos y se ha llegado a los siguientes resultados:

(x) Spiegler K.S. Salt Water Purification. New York, 1962

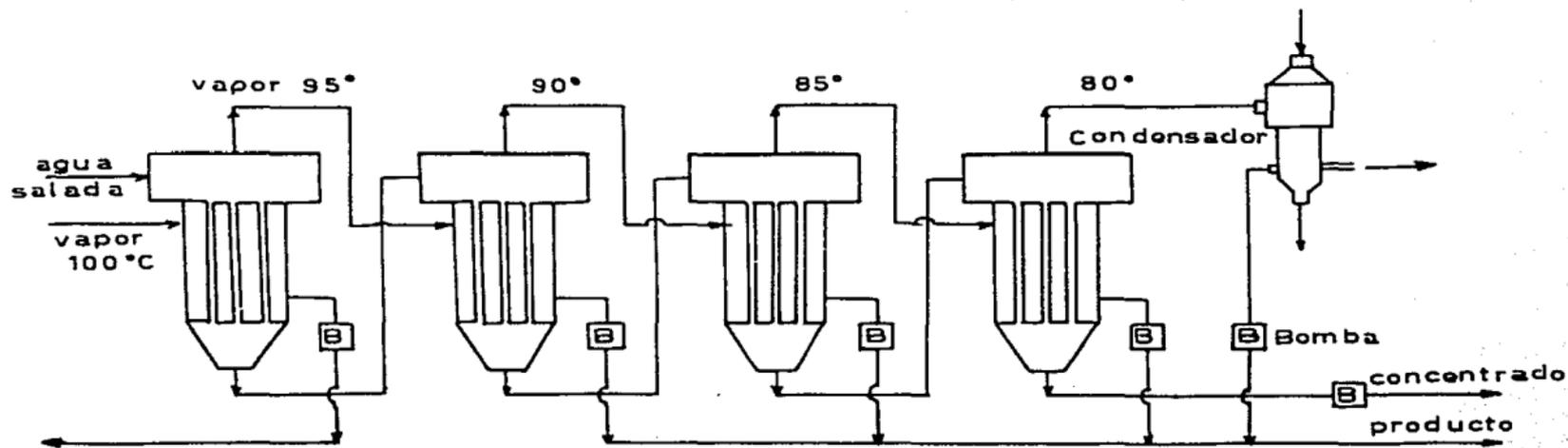


Figura 7

Principio de un Evaporador de 4 Efectos

Capacidad de la Planta

	3 795 m <sup>3</sup> /día	15 140 m <sup>3</sup> /día	30 280 m <sup>3</sup> /día
Costo total por m <sup>3</sup>	4.33 pesos	3.37 pesos	2.82 pesos
Costo directo	2.67	1.92	1.57
Costo indirecto	2.16	1.45	1.25

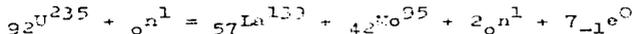
Reducciones adicionales al costo:

Aumentando el número de efectos de 12 a 14	0.128 pesos/m <sup>3</sup>
Aumentando el número de efectos de 14 a 16	0.092 pesos/m <sup>3</sup>
Usando gas natural como combustible:	0.314 pesos/m <sup>3</sup>

O sea que para plantas de la capacidad propuesta para Guaymas o Ensenada, donde se necesitan cerca de 30 000 m<sup>3</sup>/día, el costo del agua, usando evaporador de 16 efectos y quemando gas natural sería:

$$2.82 - 0.128 - 0.092 - 0.314 = 2.29 \text{ pesos por metro cúbico.}$$

La energía puede también ser obtenida en reactores atómicos por la fisión del uranio 235, de acuerdo con la reacción:



En esta reacción hay una pérdida de masa de 0.1% aproximadamente del peso de uranio, la cual se convierte en energía de acuerdo con la ecuación de Einstein:  $E = mc^2$ .

La energía liberada por un gramo de uranio 235 fisionado es de  $8.2 \times 10^7$  ergios ó  $2 \times 10^7$  kilocalorías y corresponde al calor liberado por 2 500 kilogramos de carbón; o sea que se podrían obtener 370 toneladas de agua pura con un gramo de uranio en un evaporador de múltiple efecto como el de Freeport, Texas.

La Secretaría de Recursos Hidráulicos proyecta construir una planta para el servicio municipal de Tijuana, con una capacidad de 330 litros por segundo (o cerca de 30 000 m<sup>3</sup>/día), que sería la mayor del mundo y operada probablemente con energía atómica.

Evaporación Instantánea. En este proceso se calienta el agua de mar en tubos y se pasa a cámaras con una presión inferior que la que tienen los tubos, evaporándose instantáneamente parte del agua calentada.

Esto se hace con el objeto de evitar que se formen incrustaciones, ya que los precipitados se forman en el líquido y no en la superficie de transmisión de calor.

Se puede hacer el proceso en varios efectos pasando el agua en cámaras con presiones cada vez menores, pudiéndose efectuar la evaporación a temperaturas progresivamente inferiores.

El proceso se ilustra en la figura No 9.

En un calentador inicial se calienta el agua de mar y el vapor de la primera cámara al condensarse calienta el agua que pasa a la segunda cámara y así sucesivamente.

Para la conversión del agua de mar la Fluor Corporation, Westinghouse y otras usan hasta 50 y más etapas, con costos del rango de 3.30 pesos por metro cúbico, en plantas de 4 000 m<sup>3</sup>/diarios y con inversiones de 5 300 pesos/metro cúbico diario.

Por este método se obtienen 10 000 toneladas diarias de agua potable en una gran planta en Kuwait, 3 785 m<sup>3</sup> diarios en la planta de demostración de San Diego, California que fué trasladada a Guantánamo, Cuba, 2 500 en la isla de Guernsey en el canal Británico y 1 000 en las Islas Virgenes.

El vapor de presiones entre 1 y 1.5 atmósferas se considera como vapor de baja presión y le corresponden temperaturas de condensación de 100 y 112°C. Este vapor se considera como de desecho en muchas plantas químicas y se puede utilizar tanto en la evaporación instantánea como en la de múltiple efecto. También es posible acoplar a las plantas desalinizadoras turbinas termoeléctricas para generar electricidad, lo cuál permitiría incrementar dicho fluido en estas zonas en las que se importa de los Estados Unidos; así, por ejemplo, en 1960 se generaron en toda la República 10 728 millones de kilovatios-hora y se importaron 558 millones de Kwh.

Evaporación por Compresión de Vapor. Fué ideado este método hace más de 125 años por el francés Pierre Pelletan y fué usado en gran escala para suministrar agua potable a los combatientes en pequeñas islas durante la Segunda Guerra Mundial.

Andersen, de Copenhague, ha patentado un método y en su balance económico calcula que puede desalinizar agua de mar con costos de 1.65 pesos por metro cúbico en una planta que produzca 4 000 m<sup>3</sup> diarios. En este caso la energía necesaria es de 40 a 45 Kwh por 3 785 litros.

Los costos de las plantas son bajos comparados con los evaporadores de múltiple efecto o las instalaciones por congelamiento y son:

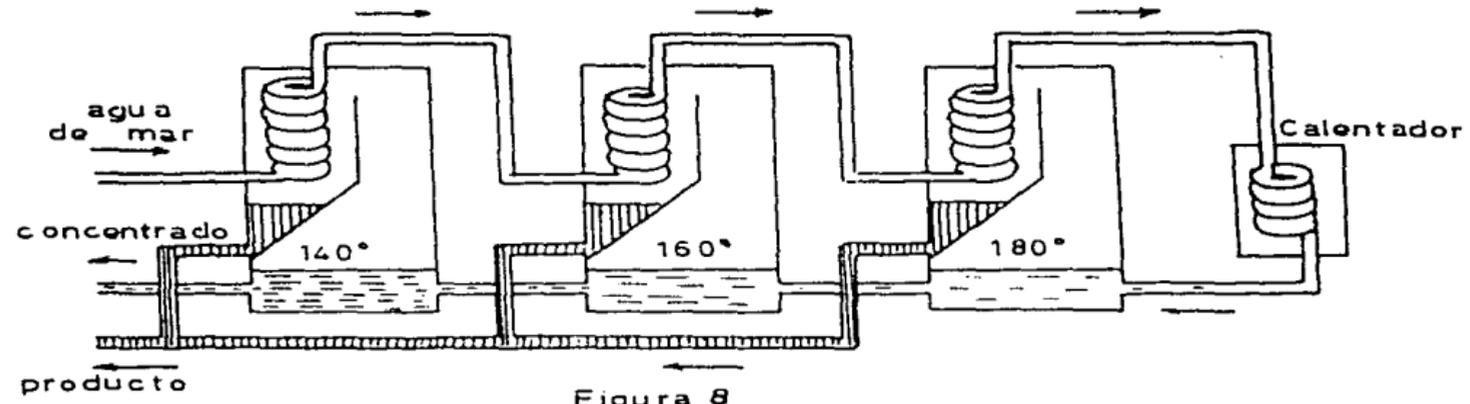


Figura 8

Evaporación Instantánea

Costo en dólares por 1000 galones diarios	Capacidad galones/día
5 000	10 000
1 500	100 000
1 000	10 000 000

Dodge ha hecho comprobaciones experimentales en una pequeña unidad y ha estimado que se necesitan 46.5 Kwh por mil galones ( 3 785 litros) con diferencias de temperatura de 1.5°C y un compresor de 80% de eficiencia.

En la figura No 9 se ilustra el proceso.

Este método tiene la ventaja de que se puede obtener una gran economía de combustible ya que se obtienen hasta 175 kg de agua destilada por kg de combustible.

Ofrece el problema de formar incrustaciones y se requiere limpiar el equipo seguido, pero se han encontrado aditivos químicos que disminuyen la formación de incrustaciones, de modo que ahora se puede trabajar hasta 4000 horas sin limpiar el equipo y hace pocos años eran 300 horas como máximo.

El principio por el que opera es utilizar su propio vapor después de haberlo comprimido como fuente de calor. La compresión hace que el vapor aumente de temperatura y condense también a una temperatura mayor, esto permite transmitir el calor del vapor a la solución ya que ésta al irse concentrando requiere cada vez una temperatura mayor para hervir. Esto permite operar con una economía correspondiente a un evaporador de 15 a 20 efectos, pero se necesita adicionar el compresor.

Se han construido pequeñas unidades compactas que producen entre 0.5 y 10 metros cúbicos diarios. La potencia que consumen es entre 40 y 100 Kwh por metro cúbico de agua pura producida a partir de la del mar; esto se debe a las grandes pérdidas de calor en los equipos pequeños.

Hara hacerlas independientes de la energía eléctrica se han diseñado pequeñas compresoras de combustión interna.

En pequeñas unidades que pesan 1.3 toneladas se pueden obtener 500 litros por hora de agua pura operando con diesel y consumiendo 1 kg de diesel por 200 kg de agua pura. Estas unidades deben ser limpiadas a los pocos cientos de horas de operación.

Suponiendo que se pudiera disponer de diesel a 20 centavos por kilogramo, el costo de combustible por metro cúbico sería:

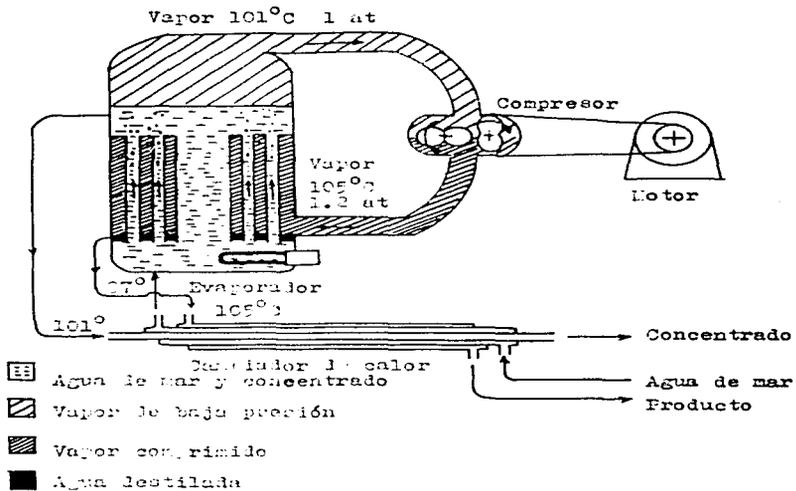


Figura 9

Evaporador por Compresión de Vapor.

101° 105°

$$0.20 \times \frac{1\ 000}{200} = 1 \text{ peso/m}^3 \text{ de agua pura.}$$

A esto tendríamos que aumentar el costo de operación, de mantenimiento y amortización del equipo.

Estas unidades se podrían usar en poblaciones costeras pequeñas (menos de 1000 habitantes) en las que faltara el agua potable, por lo pequeño y movilidad del equipo también sería posible trasladar las unidades cuando faltara el agua potable en las localidades mencionadas.

Congelamiento. Este método ofrece atractivos desde el punto de vista energético, ya que el calor de fusión del hielo es de alrededor de 80 calorías por gramo, mientras que el calor latente de evaporación de 540 calorías por gramo o sea cerca de 7 veces mayor.

Se basa en el hecho de que cuando una solución salada es enfriada se obtienen cristales de hielo puro, libres de sales. Para soluciones que sólo contienen cloruro de sodio, el punto eutéctico (temperatura mínima a la que congela una solución) corresponde a una mezcla que contiene 23.1% de sal y congela a  $-21^{\circ}\text{C}$ .

La temperatura de congelación aumenta al disminuir la concentración de la sal, pasando por  $-1.9^{\circ}\text{C}$  a 3.5% (que corresponde aproximadamente a la concentración del agua de mar). Hampel, Rose y Hoover encontraron que las medidas de las propiedades del agua de mar eran de la misma magnitud que las de soluciones de cloruro de sodio.

A cualquier temperatura superior a  $6^{\circ}\text{F}$  ( $-14.4^{\circ}\text{C}$ ) cualquier mezcla congelada de agua de mar consiste en pequeños cristales de hielo puro y concentrado (salmuera), conteniendo las diferentes sales disueltas. Si la masa congelada aparece como un sólido, la salmuera ocupa los pequeños huecos entre los grupos de los cristales de hielo y si la masa congelada es una mezcla de hielo y solución, la salmuera está adherida a la superficie de los cristales por la tensión superficial.

Esta propiedad esta explicada graficamente en la figura No 10.

Whitman W.G. (\*) estudió la migración de las bolsas con salmuera dentro de un cilindro vertical de un hielo de agua de mar y supuso que con un gradiente de temperatura a lo largo del cilindro, causaría la emigración de estas bolsas de salmuera hacia la parte más caliente del cilindro, debido a la variación de la solubilidad con la temperatura (al aumentar la temperatura aumenta la solubilidad), comprobándolo experimentalmente al colocar un cilindro de hielo de agua de mar en agua a  $-3.9^{\circ}\text{C}$

(\*) UNESCO Arid Zone Research. France, 1956.

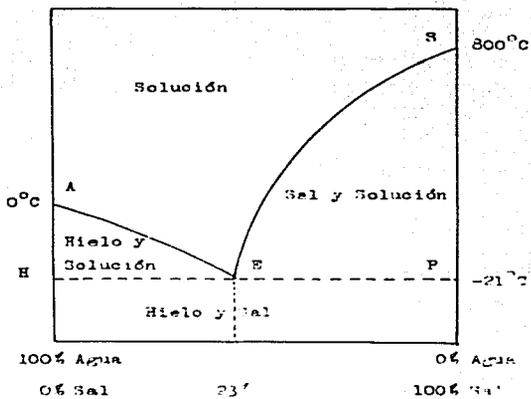


FIGURA 10

Encima de AES sólo hay fase líquida

Debajo de HEP sólo hay fase sólida ( Hielo y Sal)

E: Punto Eutético del agua de mar.

Y la parte superior expuesta al aire a  $-25^{\circ}\text{C}$  y después de 6 horas encontró que la parte superior expuesta al aire frío tenía sólo 1.36% de cloruro de sodio ( contra el 3.5% original).

Esta es la forma en que los icebergs formados en agua salada son gradualmente purificados.

El método de congelamiento tiene además las siguientes ventajas:

- a) Menos pérdidas de calor (ganancias) por trabajar a temperaturas más cercanas a la ambiente.
- b) No hay problemas de incrustaciones y
- c) Mucho menor corrosión del acero a la temperatura de fusión que a la de ebullición. Y se pueden utilizar otros materiales más baratos como concreto ó plástico.

Se han desarrollado dos procesos: congelamiento directo e indirecto. En el primero el agua de mar es el mismo refrigerante en el que al evaporarse una parte produce el frío necesario para la formación de hielo. En el segundo un líquido más volátil como por ejemplo butano es el refrigerante.

**Congelamiento Directo o Proceso Carrier.** El agua enfriada previamente entra a la torre de enfriamiento o cristalizador en donde la presión es de 3 a 4 milímetros de mercurio ( 0.005 atmósferas) y en donde se evapora rápidamente una parte del agua, congelando a otra. La temperatura de congelamiento para el agua de mar es de  $-1.9^{\circ}\text{C}$  y para la concentrada al doble de  $-3.8^{\circ}\text{C}$ .

Cada kilogramo de agua evaporada forma 7 kg de hielo en forma de pequeños cristales ( generalmente menores de 1 milímetro). Como estos cristales tienen adherida una gran cantidad de la salmuera son lavados a contracorriente con una pequeña cantidad de agua pura. Para fundir estos cristalitos de hielo se utiliza el calor de condensación del vapor formado. El principio se ilustra diagramáticamente en la figura No 11.

**Congelamiento Indirecto.** Para evitar la formación de grandes cantidades de vapor ( y consecuentemente trabajar con equipo grande) y también para no trabajar a presiones tan bajas como en el método anterior se puede utilizar un refrigerante no miscible con el agua de manera que los dos líquidos puedan ser separados fácilmente. Este método emplea isobutano o butano como refrigerante y el cuál tiene una temperatura de ebullición (a la presión atmosférica) muy cercana a la de congelación del agua, de  $-0.5^{\circ}\text{C}$ .

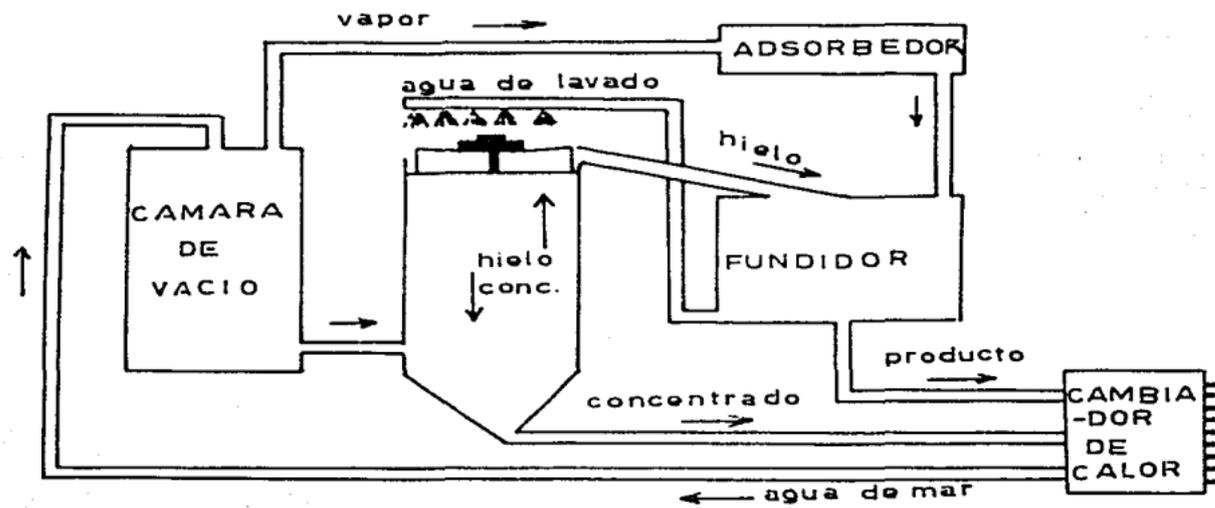


FIGURA 11

DIAGRAMA DEL PROCESO DE CONGELACION

Se introducen agua y butano al congelador, donde se mantiene una presión ligeramente inferior a la atmosférica, el butano se evapora tomando su calor del agua y provocando la formación de hielo. El calor de evaporación del butano es de 91 calorías por gramo a  $-3^{\circ}\text{C}$ , por lo que por cada gramo de butano evaporado se forma sólo 1.15 gramos de hielo. Con un compresor se aumenta ligeramente la presión del vapor del butano y se pone este en contacto con los cristales de hielo (previamente lavados a contracorriente como en el método anterior), haciendo que el hielo se funda y el vapor de butano condense y por ser no miscibles y tener diferentes densidades: 1.00 el agua y 0.6 el butano, se separan los dos líquidos.

Los cristales de hielo formados son semejantes a los de nieve húmeda.

Se ha trabajado durante varios años una planta de este tipo produciendo 200 m<sup>3</sup> de agua pura diariamente.

Los costos estimados son menores que los de otros métodos; una planta de 50 000 galones por día ( 200 m<sup>3</sup>/día) fué construida por cerca de 1 250 000 pesos.

Una planta de un millón de galones diarios ( 3 785 m<sup>3</sup>), se estima en menos de 12 500 000 pesos.

La energía total requerida es de 7.13 kwh por m<sup>3</sup>, basada en operaciones de plantas piloto, y se esperan valores menores para instalaciones mayores.

El costo actual de producción incluyendo la amortización del capital se ha estimado para una planta de un millón de galones diarios en el orden de 1.15 a 1.50 pesos por metro cúbico de agua pura producida. Este método es de patente japonesa.

Estos son los métodos que actualmente ofrecen mayores posibilidades económicas. Hay muchos otros métodos para purificar el agua de mar, pero actualmente no han dado resultados económicos satisfactorios con relación a los anteriores siendo estos los siguientes:

Electro-diólisis. En este caso los iones son extraídos eléctricamente concentrándolos en compartimentos separados por membranas permeables para cationes unas y para aniones otras, colocadas en forma alternada.

Este método ofrece resultados satisfactorios cuando la agua por tratar tienen un contenido en sales entre 800 y 3000 partes por millón (0.03 a 0.3%).

Hay unas plantas de este tipo que purten de aguas de minas como la de Welkom, Surafrica, con un contenido en sales de 2800 partes por millón y la reduce a 800, siendo esta la mayor y produce 323 m<sup>3</sup> por hora; o bien de agua de pozos como las plantas de Tobruk, Libia, Salt Lake City, Utah y Coalinga, California que producen entre 2 y 5 metros cúbicos por hora y disminuyen la salinidad de 3000-4000 partes por millón a 500.

Intercambio Iónico. Por medio de sustancias químicas se sustituyen los cationes (iones Na<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup> y K<sup>+</sup>) por iones hidrógeno (H<sup>+</sup>) y con otra resina orgánica se sustituyen los aniones (Cl<sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>==</sup>, SO<sub>4</sub><sup>==</sup>) por iones oxhidrilo (OH<sup>-</sup>), los que se combinan con los iones hidrógeno formando agua. Las resinas se pueden despues regenerar y volver a utilizar.

Este método sólo es económico partiendo de aguas con un contenido en sales de unos pocos cientos de partes por millón. Y se pueden obtener aguas con una pureza muy grande. Este procedimiento se utiliza con fines industriales (como por ejemplo para tratar el agua utilizada en las calderas).

Debido a que se necesitan grandes cantidades de reactivos (para regenerar las resinas) este método no es aceptable para purificar el agua de mar.

Otros métodos aún en estudio son: extracción por solventes, ultrafiltración, osmólisis, destilación a la presión crítica, bombas electromagnéticas, etc.

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES

Por lo expuesto en el capítulo anterior, se llega a la conclusión que los métodos más económicos en la actualidad son: evaporación de múltiple efecto, evaporación instantánea, congelamiento indirecto y para cantidades muy pequeñas la evaporación solar.

La fuente de energía más apropiada en México es el gas natural ya que es abundante en el país, en 1965 se produjeron 13 964 641 millares de metros cúbicos; además el uso del mismo tiene la ventaja de la facilidad de su manejo y transporte. El petróleo también es abundante habiéndose producido más de 132 millones de barriles en 1965. El carbón mineral no es muy abundante ya que se produjeron cerca de 2 millones de toneladas en el mismo año y, por consiguiente, tiene un costo elevado de 68 pesos la tonelada.

La electricidad tampoco es conveniente utilizarla para desalinizar el agua de mar, ya que su producción es deficiente y más de la mitad es de origen termoeléctrico.

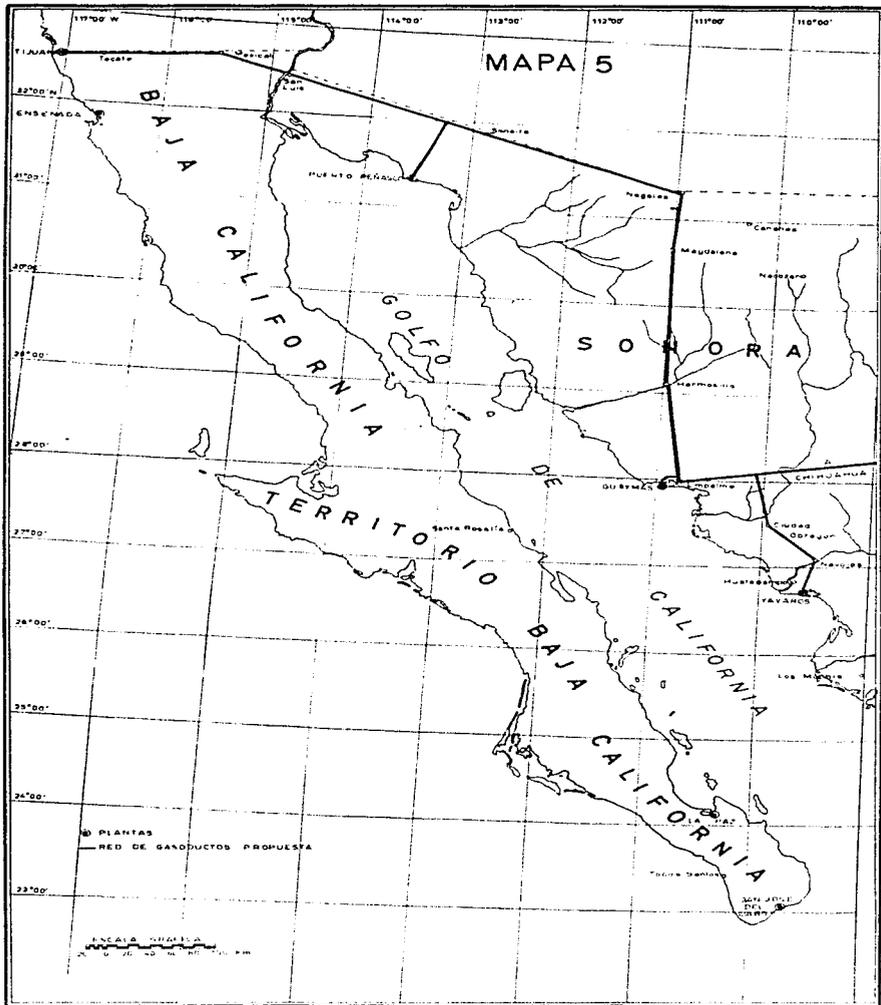
Para un futuro cercano la fuente de energía más importante será la atómica, habiéndose encontrado yacimientos de uranio en Chihuahua, Michoacán y Oaxaca, de los cuales no se han determinado las reservas, pero se estima que son considerables.

El suministro de combustible, gas natural, sería por gasoductos a partir del de Chihuahua, en proyecto, con una red, como la propuesta en el mapa, para las poblaciones de Sonora y Baja California.

Para el Territorio de Baja California Sur, La Paz y San José del Cabo, no convendría trazar el gasoducto para un gasto tan reducido y una distancia tan grande, sino que se utilizaría petróleo refinado o aceite combustible transportado por barco.

Hasta ahora se ha considerado como producto sólo el agua obtenida del mar, ya que en todos los procesos generalmente se concentra hasta cerca del doble, o sea al 7%, y este concentrado se vuelve a arrojar al mar, pero es posible efectuar concentraciones sucesivas para obtener por precipitación las diferentes sales.

Así, por ejemplo, si se extrajera todo el oro que hay en solución en el agua de mar tendríamos un cubo de 800 metros de lado o sea:  $800 \text{ m} \times 800 \text{ m} \times 800 \text{ m} \times 19 \text{ ton/m}^3 = 9\,728\,000\,000$  toneladas, que distribuidos entre todos los habitantes del mundo correspondería a más de 3



toneladas de oro por persona. Y esto a pesar de que la cantidad de oro en el agua de mar es pequeñísima, de 0.000006 gramos por metro cúbico, y debido a esta concentración tan pequeña no es costeable su explotación.

Si todas las sales que contiene el agua de mar se distribuyeran uniformemente en toda la tierra, formarían una costra de 48 metros. Esto nos da idea de la cantidad enorme de sales que contiene.

En el presente sólo son costeables la extracción de la sal común o de cocina que contiene 96% de cloruro de sodio.

El magnesio, del que contiene 1.27 gramos por litro y se puede obtener precipitándolo con bases. La extracción de magnesio a partir del agua de mar se efectúa en Estados Unidos, Gran Bretaña, Italia y Francia. En Estados Unidos se produjeron en 1943 22 000 toneladas de magnesio marino.

También se extraen comercialmente el potasio del que contiene 0.38 gramos por litro y el bromo con 65 gramos por metro cúbico.

También se ha pensado obtener energía del mar, Georges Claude trató de hacer girar una turbina valiéndose de la diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo del mar.

En ciertos lugares las amplitudes de marea son mayores de 12 metros como en Canadá, en la Bahía de Fundy y en la bahía de Probisher; en Inglaterra, en el estuario del Severn; en Francia, en la bahía de Mont Saint Michel; en Argentina, en Puerto Gallegos, donde se puede aprovechar esta para generar energía. En Estados Unidos en Passamaquoddy, Maine; se empezó en 1935 a construir un sistema hidroeléctrico de compuertas y diques destinado a generar 3 000 millones de kilovatios-hora, pero se abandonó al año siguiente por considerarlo demasiado costoso y por el advenimiento de la energía nuclear.

En Francia se hacen estudios actualmente, en la Sociedad de Estudios para la Utilización de las Mareas, para la construcción de plantas maremotrices, en el estuario de la Rance y en la bahía de Monte Saint Michel.

En California, Estados Unidos, se hizo el proyecto de traer icebergs de varios kilómetros cuadrados de área desde la Antártida con remolcadores y aprovechando la corriente de Humboldt, en un viaje de un año, en el transcurso del cuál perdería cerca de la mitad de su volumen pero aún así suministraría varios millones de metros cúbicos de agua potable a la ciudad de Los Angeles.

En la República Mexicana, a pesar de la necesidad apremiante de agua potable, no se realizan los estudio que debieran sobre este tema, siendo la única planta piloto la de Puerto Peñasco y un proyecto de una gran planta, la mayor del mundo, movida por energía atómica para obtener agua potable y energía eléctrica para la ciudad de Tijuana.

Treinta millones de habitantes carecen de servicio de agua potable en gran número de poblaciones urbanas el agua potable es deficiente o carecen de ella y raras son las poblaciones de menos de 2500 habitantes que disponen de agua potable.

En diez años de estudios organizados sobre la desalinización de agua de mar los costos se han reducido de 12 a 3 pesos por metro cúbico, lo cual ya la hace costeable para usos domésticos en unas pocas poblaciones con gran deficiencia de agua, pero se tendría que bajar 10 veces más para que fuera costeable en la industria y 100 para que lo fuera en agricultura.

Como los costos del agua disponible van en constante aumento y esta es cada vez más escasa, y el costo del agua desalinizada del mar es cada vez menor, es de esperarse que pronto gran parte del suministro del agua sea de los océanos.

Tal vez con la invención de un nuevo método que revolucione completamente los actuales y se pueda obtener agua potable, precipitando en forma sencilla las sales disueltas en el agua de mar, se hará así posible su uso en la agricultura; pudiendo convertirse parte de las extensas regiones áridas en verdes campos para beneficio de la humanidad.

BIBLIOGRAFIA

1. Antaramián H. E. Diseño de un Evaporador para Desalinizar Agua de Mar. Tesis Profesional. México, D.F., 1964
2. Bavach A. 1975 y los Cambios Naturales. Editorial F. Trillas S.A. México, D.F., 1965
3. Blásquez L.L. Hidrogeología de las Regiones Desérticas de México. Anales del Instituto de Geología. Tomo XV México, D.F., 1959
4. Bryman S.E. Potabilización de Agua de Mar por Congelación para la Termoelectrónica de Tijuana. Tesis Profesional. México, D.F., 1961
5. De la O Carreño A. Las Provincias Geohidrológicas de México (Segunda Parte) UNAM. Instituto de Geología. Boletín N° 56 México, D.F. 1954.
6. Department of the Interior. Office Saline Water. U.S. Saline Water Conversion. U.S. Government Printing Office. Washington D.C., 1962.
7. Engel. L. El Mar. Colección de la Naturaleza de Life. México, D.F., 1962
8. Feresman A.E. Geoquímica Recreativa. Ediciones en Lenguas Extranjeras. Moscú URSS.
9. Fowler W. La Ciencia ante el Problema del Agua. Revista Saber. Marzo de 1966 . pp 2 a 6.
10. González Reyna J. Riqueza Minera y Yacimientos Minerales de México. Departamento de Investigaciones Industriales. Banco de México S.A., 1956.
11. Hachette. La Mer. Encyclopedía par L'image. Librairie Hachette. Paris, 1958.
12. Instituto de Geofísica. Departamento de Oceanografía. UNAM.

- Boletín N° 7. Densidad del Agua de Mar. C.U. México, D.F., 1959
13. Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables. Mesas Redondas Sobre Problemas de las Zonas Áridas de México. Ediciones del IMRNR. A.C. México, D.F., 1955.
  14. Ingeniería. Revista. La Planta de Aprovechamiento del agua del mar en San Diego. California. México, D.F. Enero 1963 pp 81-84.
  15. Leicester J. Vapour Compression Distillation. Chemistry and Industry. December 31, 1951.
  16. Loehnberg A. Water and Economic Development. Impact of Science on Society. Vol. IX N° 1, 1958.
  17. Maderey R.É. Estudio Preliminar Sobre las Aguas Subterráneas en México. Tesis Profesional. México, D.F., 1965
  18. Mancilla U.M. Importancia del Aprovechamiento de la Energía Solar Tesis Profesional. México, D.F., 1961
  19. Othmer F. Fresh Water From the Ocean. British Chemical Engineering November, 1961. Vol 6 N° 11.
  20. Secretaría de Industria y Comercio. Compendio Estadístico 1960. Dirección General de Estadística. México. Talleres Gráficos de la Nación., 1962.
  21. Spiegler K.S. Salt Water Purification. John Wiley & Sons Inc. New York, 1962.
  22. Stretta E.J.P. y Mosiño O.A. Distribución de las Zonas Áridas de la República Mexicana. Ingeniería Hidráulica en México. México, D.F., 1963.
  23. Sullivan W. Asalto a lo Desconocido. El Año Geográfico Internacional. Librerías Mexicanas Unidas. México, D.F., 1963.

24. Everitup H.W. The Oceans. Prantico Hall Inc. N.J., 1942
25. Tamayo J. Los Recursos de Agua en México. ENHR. Mesas Redondas Sobre Problemas del Agua en México. México, D.F., 1965
26. Toscano R. Meteorología Descriptiva y Dinámica. Imprenta Universitaria. México, D.F., 1950.
27. UNESCO. Arid Zone Research. Utilization of Saline Water. Review of Research. France, 1956.
28. Vivó A.J. Geografía de México. Fondo de Cultura Económica. México, D.F., 1953.
29. Vivó A.J. La Conquista de Nuestro Suelo. Ediciones de la Cámara Nacional de la Industria de Transformación. México, D.F., 1958.

INDICE

	Página
CAPITULO I. CRECIMIENTO ACELERADO DE LA POBLACION Y LOS RECURSOS HIDROLOGICOS	1
CAPITULO II. ZONAS ARIDAS Y SEMIARIDAS DEL PAIS	7
CAPITULO III. GENERALIDADES SOBRE EL AGUA DEL MAR	14
Composición química	14
Propiedades físicas	18
a) Densidad	18
b) Temperatura	19
c) Calor específico	21
d) Calor latente de evaporación	21
e) Punto de fusión	21
f) Punto de ebullición	22
g) pH	22
CAPITULO IV. LOCALIZACION DE LAS PLANTAS DE DESALINIZACION	23
CAPITULO V. METODOS Y COSTOS DE DESALINIZACION.	39
a) Evaporación solar	39
b) Planta piloto de Puerto Peñasco, Sonora	44
c) Los métodos de destilación	45
d) Múltiple efecto	47
e) Evaporación instantánea	49
f) Evaporación por compresión de vapor	50
g) Congelamiento	52
h) Electrodialisis	54
i) Intercambio iónico	55
CAPITULO VI. CONCLUSIONES	56
BIBLIOGRAFIA	59