



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA AMBIENTAL – AGUA**

**EVALUACIÓN DE UN DESTILADOR SOLAR TIPO INVERNADERO ASISTIDO CON TELAS  
DE EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE AGUA POTABLE A PARTIR DE  
AGUA DE MAR**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**MÓNICA GUADALUPE LÓPEZ ORTEGA**

**TUTOR PRINCIPAL**  
**ANA ELISA, SILVA, MARTÍNEZ, FI**  
**COMITÉ TUTOR**  
**JOSÉ LUIS, FERNÁNDEZ, ZAYAS, II**  
**ALEJANDRA, MARTÍN, DOMÍNGUEZ, FI-CM**

**MÉXICO, D. F. 2014**

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS  
Secretario: DRA. ALEJANDRA MARTÍN DOMÍNGUEZ  
1er. Vocal: DR. ENRIQUE RODOLFO BAZUA RUEDA  
2do. Vocal: MI. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE  
3er. Vocal: DRA. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ

Lugar donde se realizó la tesis: DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**TUTOR DE TESIS:**

DRA. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ

---

**FIRMA**

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b> .....	<b>1</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>8</b>
1.1 Justificación .....	8
1.2 Hipótesis .....	15
1.3 Objetivo .....	15
1.3.1 Objetivos particulares .....	15
<b>CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES</b> .....	<b>17</b>
2.1 Clasificación del agua .....	17
2.2 Proceso de desalinización .....	19
2.2.1 Tecnologías para la extracción de sales .....	20
2.2.2 Tecnologías para la extracción del agua .....	21
<b>CAPÍTULO 3 DESTILACIÓN SOLAR</b> .....	<b>26</b>
3.1 Historia de la destilación solar .....	26
3.2 Clasificación de los sistemas de destilación solar .....	28
3.3 Transferencia de masa y calor .....	29
<b>CAPÍTULO 4 EVAPOTRANSPIRACIÓN EN DESTILACIÓN SOLAR</b> .....	<b>32</b>
<b>CAPÍTULO 5 FIBRAS TEXTILES</b> .....	<b>35</b>
5.1 Color .....	38
<b>CAPÍTULO 6 RADIACIÓN SOLAR</b> .....	<b>41</b>
<b>CAPÍTULO 7 CONTAMINACIÓN AMBIENTAL ASOCIADA A LA DESALINIZACIÓN</b> .....	<b>49</b>
7.1 Descarga en aguas superficiales .....	51

7.2 Descarga en drenaje sanitario .....	52
7.3 Inyección en pozos profundos .....	53
7.4 Estanques de evaporación .....	53
7.5 Riego por aspersión.....	54
7.6 Cero descarga de líquidos .....	54
7.7 Gestión regional del concentrado .....	55
7.8 Uso beneficioso del concentrado.....	56
<b>CAPÍTULO 8 METODOLOGÍA.....</b>	<b>58</b>
8.2 Alcances y limitaciones.....	62
8.3 Procedimiento experimental .....	63
8.2.1 <i>Experimento 1</i> : Evaluación de la capacidad de producción de agua destilada al cambiar la coloración de la superficie de evapotranspiración. ....	65
8.2.2 <i>Experimento 2</i> : Estimación del volumen de destilado producido al cambiar la fibra textil utilizada como superficie de evapotranspiración.....	66
8.2.3 <i>Experimento 3</i> : Evaluación de la capacidad de producción de agua destilada al variar la altura de la superficie de evapotranspiración.....	67
<b>CAPÍTULO 9 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>69</b>
9.1 Experimento 1: Evaluación de la capacidad de producción de agua destilada al cambiar la coloración de la superficie de evapotranspiración. ....	69
9.2 <i>Experimento 2</i> : Estimación del volumen de destilado producido al cambiar la fibra textil utilizada como superficie de evapotranspiración. ....	70
9.3 <i>Experimento 3</i> : Evaluación de la capacidad de producción de agua destilada al variar la altura de la superficie de evapotranspiración. ....	74
9.4 Calidad del agua.....	76
9.5 Resultado global .....	78
9.5.1 Costos.....	79
<b>CAPÍTULO 10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>81</b>

10.1 Conclusiones .....	81
10.2 Recomendaciones .....	82
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>87</b>
<i>ANEXO 1. Resultados Experimento 1: Evaluación de la capacidad de producción de agua destilada al cambiar la coloración de la superficie de evapotranspiración. ....</i>	<i>87</i>
<i>ANEXO 2. Resultados experimento 2: Estimación del volumen de destilado producido al cambiar la fibra textil utilizada como superficie de evapotranspiración. ....</i>	<i>90</i>
<i>ANEXO 3. Resultados experimento 3: Evaluación de la capacidad de producción de agua destilada al variar la altura de la superficie de evapotranspiración. ....</i>	<i>93</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. DISTRIBUCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN MÉXICO.....	10
FIGURA 1.2. COBERTURA DE AGUA POTABLE.....	11
FIGURA 1.3. GRADO DE MARGINACIÓN EN MÉXICO .....	12
FIGURA 1.4. GRADO DE MARGINACIÓN Y COBERTURA DE AGUA POTABLE MENOR AL 70% .....	12
FIGURA 1.5. DISTRIBUCIÓN DE LOCALIDADES RURALES, URBANAS Y MIXTAS EN MÉXICO. ....	13
FIGURA 2.6. CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE DESALINIZACIÓN.....	20
FIGURA 2.7. A) PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO; B) RESINA SATURADA.....	21
FIGURA 2.8. OPERACIÓN DE UN DESTILADOR DE MÚLTIPLE EFECTO.....	22
FIGURA 2.9. DESTILACIÓN POR COMPRESIÓN MECÁNICA DE VAPOR.....	24
FIGURA 2.10. ESQUEMA DEL DESTILADOR SOLAR SIMPLE .....	24
FIGURA 3.1. PLANTA “LAS SALINAS”, CHILE. ....	27
FIGURA 3.2. DESTILADOR PORTÁTIL PATENTADO POR TELKES.....	27
FIGURA 3.3. CLASIFICACIÓN DE DESTILACIÓN SOLAR DIRECTA E INDIRECTA. ....	29
FIGURA 4.1. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UNA ESTOMA.....	32
FIGURA 6.1. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y LUZ VISIBLE.....	42
FIGURA 6.2. DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE LA RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE EN EL TOPE DE LA ATMÓSFERA Y AL NIVEL DEL MAR...	43
FIGURA 6.3. BALANCE ENERGÉTICO DE LA RADIACIÓN SOLAR.....	44
FIGURA 6.4. RELACIÓN ENTRE EL PLANO HORIZONTAL LOCAL Y LOS RAYOS SOLARES. ....	45
FIGURA 6.5. INTENSIDAD DE LA RADIACIÓN SOLAR .....	47
FIGURA 6.6. NIVELES DE RADIACIÓN SOLAR, MÉXICO. ....	48
FIGURA 8.1. CASETAS DE DESALINIZACIÓN SOLAR. ....	59
FIGURA 8.2. UBICACIÓN DE LAS CASETAS. ....	59
FIGURA 8.3. CANALETAS PARA EL AGUA CRUDA.....	60
FIGURA 8.4. UBICACIÓN DEL MATERIAL POROSO EN LAS CANALETAS.....	61
FIGURA 8.5. SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE DESTILADO.....	62
FIGURA 8.6. CASETAS DE DESTILACIÓN SOLAR EXPERIMENTO 1 .....	65
FIGURA 8.7. FIBRAS TEXTILES.....	66
FIGURA 8.8. ALTURAS.....	68
FIGURA 9.1. PRODUCCIÓN DE DESTILADO PARA DIFERENTES FIBRAS TEXTILES .....	72
FIGURA 9.2. PRODUCCIÓN DE DESTILADO ACUMULADO POR FIBRA TEXTIL.....	73
FIGURA 9.3. PRODUCCIÓN DE DESTILADO POR CASETA Y FIBRA TEXTIL.....	73
FIGURA 9.4. PRODUCCIÓN DE DESTILADO POR ALTURA .....	75
FIGURA 9.5. CRISTALES DE SAL.....	77

FIGURA 9.6. NIVELES DE RADIACIÓN ( $W/M^2$ ) <sup>12</sup> DE SEPTIEMBRE DEL 2013 .....	78
---	----

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. PAÍSES CON MAYOR AGUA RENOVABLE PER CÁPITA, 2010 .....	10
TABLA 1.2. POBLACIÓN POR TAMAÑO DE LOCALIDAD Y COBERTURA DE AGUA, ESTADOS COSTEROS.....	14
TABLA 2.3. CLASIFICACIÓN DEL AGUA CON BASE EN EL CONTENIDO DE SALINIDAD. ....	17
TABLA 2.4. COMPOSICIÓN DEL AGUA DE MAR ESTÁNDAR .....	18
TABLA 2.5. PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AGUA DE MAR CON 35 000 MG/L A 20°C.....	19
TABLA 5.1. FIBRAS NATURALES APLICABLES EN EL PROYECTO.....	36
TABLA 5.2. FIBRAS MANUFACTURADAS APLICABLES EN EL PROYECTO .....	37
TABLA 5.3. CALOR RADIANTE ABSORBIDO PARA SUPERFICIES LISAS .....	40
TABLA 6.1. PROPIEDADES RADIANTES DE LAS SUPERFICIES NATURALES .....	46
TABLA 8.1. CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DEL POLICARBONATO .....	58
TABLA 8.2. MAGNITUD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO EN LOS MESES DE EXPERIMENTACIÓN .....	60
TABLA 8.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES .....	61
TABLA 8.4. CALIDAD DEL AGUA EN INSTALACIONES DE LA UNAM.....	64
TABLA 8.5. COMPOSICIÓN TELAS ADQUIRIDAS .....	66
TABLA 8.6. ALEATORIZACIÓN EMPLEADA EXPERIMENTO 3.....	67
TABLA 8.7. NIVELES EMPLEADOS EXPERIMENTO 2 .....	67
TABLA 9.1. VOLÚMENES (ML) OBTENIDOS EXPERIMENTO 1 .....	69
TABLA 9.2. RESULTADOS ANOVA EXPERIMENTO 1.....	70
TABLA 9.3. VOLÚMENES (ML) OBTENIDOS POR TIPO DE FIBRA.....	71
TABLA 9.4. ANÁLISIS DE VARIANZA EXPERIMENTO 2.....	71
TABLA 9.5. ANÁLISIS CON DISEÑO FACTORIAL EXPERIMENTO 2.....	71
TABLA 9.6. VOLÚMENES OBTENIDOS (ML) EXPERIMENTO 3 .....	74
TABLA 9.7. RESULTADOS ANOVA EXPERIMENTO 3.....	74
TABLA 9.8. RESULTADOS PROMEDIO ORDENADOS PARA LA PRUEBA DE DUNCAN.....	75
TABLA 9.9. COMPARACIÓN DE MEDIAS.....	75
TABLA 9.10. CONCENTRACIÓN DE SALES EN CORRIENTES DEL SISTEMA .....	76
TABLA 9.11. CONCENTRACIÓN EN SALMUERA DE DISTINTOS PROCESOS.....	77
TABLA 9.12. COSTO DESTILADOR SOLAR TIPO INVERNADERO .....	79
TABLA 9.13. COSTO POR LITRO DE AGUA EN DIFERENTES DESTILADORES.....	80
TABLA A.1. RESULTADOS (ML) EXPERIMENTO 1.....	87
TABLA A.2. RESULTADOS PROMEDIO (ML) EXPERIMENTO 1 .....	87

TABLA A.3. SUMA DE CUADRADOS EXPERIMENTO 1.....	88
TABLA A.4. SUMA DE CUADRADOS DE TRATAMIENTOS EXPERIMENTO 1.....	88
TABLA A.5. SUMA DE CUADRADOS DE BLOQUES EXPERIMENTO 1.....	88
TABLA A.6. ANÁLISIS DE VARIANZA EXPERIMENTO 1.....	89
TABLA A. 7. RESULTADOS (ML) EXPERIMENTO 2.....	90
TABLA A. 8. RESULTADOS PROMEDIO (ML) EXPERIMENTO 2.....	90
TABLA A. 9. SUMA DE CUADRADOS EXPERIMENTO 2.....	90
TABLA A. 10. SUMA DE CUADRADOS DE TRATAMIENTOS EXPERIMENTO 2.....	91
TABLA A. 11. SUMA DE CUADRADOS DE BLOQUES EXPERIMENTO 2.....	91
TABLA A. 12. ANÁLISIS DE VARIANZA EXPERIMENTO 2.....	92
TABLA A. 13. RESULTADOS (ML) EXPERIMENTO 3.....	93
TABLA A. 14. RESULTADOS PROMEDIO (ML) EXPERIMENTO 3.....	93
TABLA A. 15. SUMA DE CUADRADOS EXPERIMENTO 3.....	93
TABLA A. 16. SUMA DE CUADRADOS DE TRATAMIENTOS EXPERIMENTO 3.....	94
TABLA A. 17. SUMA DE CUADRADOS DE BLOQUES EXPERIMENTO 3.....	94
TABLA A. 18. ANÁLISIS DE VARIANZA EXPERIMENTO 3.....	95
TABLA A. 19. RESULTADOS PROMEDIO POR ALTURA (ML).....	95
TABLA A. 20. ANÁLISIS DE VARIANZA DUNCAN EXPERIMENTO 3.....	95
TABLA A. 21. ERROR ESTÁNDAR.....	96
TABLA A. 22. COMPARACIÓN DE MEDIAS.....	96

## RESUMEN

La destilación solar representa una excelente alternativa en regiones donde el acceso al agua potable está limitado por la falta de energía eléctrica y disponibilidad de fuentes de agua donde la demanda de agua fresca es baja.

Uno de los diseños de destiladores solares más sencillos es el destilador pasivo tipo invernadero, que al combinarse con la evapotranspiración adicionando al sistema materiales porosos que permiten aumentar el área superficial se logra una mayor producción de agua. El color y el tipo de fibra, así como la altura de las telas empleadas como sistema evapotranspirador, influyen en el volumen de destilado obtenido en una caseta de destilación.

Con este trabajo se lograron evaluar algunos parámetros que intervienen en el funcionamiento de un destilador solar tipo invernadero asistido con telas de evapotranspiración, permitiendo incrementar la producción de agua potable a partir de agua de mar, logrando elevar la producción en un 80% y obteniendo 3.56 L/m<sup>2</sup>día contra 0.71 L/m<sup>2</sup> día en la caseta simple.

Instalando telas blancas de algodón a 30 cm de la superficie del agua en el sistema se obtiene la producción máxima, que al ser evaluada con los costos del destilador, compite con el costo por litro que presentan otros destiladores solares publicados.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Justificación

El agua es vital para la existencia de la vida tal como la conocemos. Cada día los seres humanos realizamos una importante variedad de actividades que involucran el uso del agua en diversas cantidades; se necesita en actividades industriales, en la agricultura, transporte, energía, recreación y por supuesto con fines domésticos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2003) define como agua de uso doméstico el agua que se utiliza para consumo, higiene personal y para la preparación de comida, variando desde 15 (SPHERE, 2002) hasta 50 litros por persona por día (Gleik, 1996). Sin embargo, para garantizar que se cubran las necesidades más allá de las individuales, como aquellas referentes a hospitales, escuelas, etc., se requiere aumentar esta cantidad; misma que se seguirá incrementando conforme se eleven los estándares de calidad de vida y el número de personas sobre la tierra, ocasionando que en un futuro no tan lejano la demanda sea mayor que la cantidad de agua disponible (Cipollina et al., 2009).

Del total del agua que técnicamente está disponible para consumo humano, sólo una pequeña porción se encuentra accesible en lagos, ríos, humedad del suelo y depósitos subterráneos relativamente poco profundos, pero, lejos de las zonas pobladas, lo cual dificulta o encarece su utilización efectiva.

Las reservas de agua dulce son muy importantes, pero en muchos casos están afectadas por diversos problemas de contaminación o de accesibilidad y las poblaciones que no cuentan con los medios necesarios para su transporte y purificación se ven afectadas por hambrunas y enfermedades que generalmente afectan a los niños.

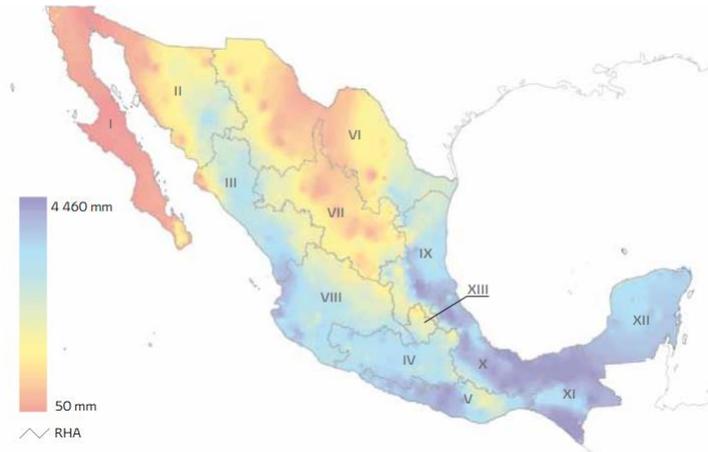
El 70% de la superficie de la tierra es agua y más del 90% representa el agua de océanos y mares que por sus altos contenido de sales no es apta para su consumo, sin embargo, el incremento de la demanda de agua fresca vuelve necesaria la búsqueda de fuentes alternas que permitan satisfacer nuestras necesidades obligando a integrar la desalinización como una fuente más de suministro de agua.

Su disponibilidad promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 millones de km<sup>3</sup> (CONAGUA, 2011a), de los cuales el 97.5% corresponde al agua de mar y solo el 2.5% es agua dulce pero, de este 2.5% de agua dulce, un importante 80% se encuentra en los glaciares como agua congelada, así que, solo el 0.5% de la cantidad total de agua disponible puede ser encontrada en lagos, ríos y acuíferos.

El ciclo del agua juega un papel muy importante permitiendo que la cantidad total de agua en la tierra se mantenga con el paso del tiempo, en este ciclo el agua se evapora de los océanos y aguas superficiales hacia la atmósfera y se acumula en forma de nubes de las que se origina la lluvia. Ésta precipitación alimenta las aguas subterráneas, superficiales y los océanos. Sin embargo, la disponibilidad local de agua dulce depende del nivel de precipitaciones.

En México anualmente se reciben del orden de 1.489 km<sup>3</sup> de agua en forma de precipitación entre junio y septiembre sumando el 68% del total de precipitación normal mensual como lo reportó CONAGUA (2011b); de esta cantidad, cerca del 73.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, solo el 22.1% escurre por los ríos o arroyos del país que forman una red de 633 000 km de longitud, y el 4.8% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos.

La distribución de la precipitación no es uniforme, en México una gran parte del país tiene problemas de abastecimiento debido a esto. En la Figura 2.1, la región 1, representada por Baja California Norte y Sur, expresa muy bien la problemática que se quiere abordar en este trabajo, ya que los niveles de precipitación son tan bajos que el agua dulce no es suficiente y a pesar de estar rodeadas de agua no pueden abastecer a su población.



*Figura 1.1. Distribución de las precipitaciones en México*  
 Fuente: CONAGUA. Coordinación del Servicio Meteorológico Nacional 2010

La precipitación de agua no es el único factor que influye en la disponibilidad del agua. El agua renovable *per cápita* de un país expresa el agua disponible entre la población, es decir, la cantidad de agua que corresponde a cada persona por año.

No	País	Población (miles habitantes)	Agua renovable (miles de millones de m <sup>3</sup> )	Agua renovable <i>per cápita</i> (m <sup>3</sup> /hab/año)
1	Guayana Francesa	220	134	609 091
2	Islandia	315	170	539 683
3	Guyana	763	241	315 858
4	Surinam	515	122	236 893
5	Congo	3 615	832	230 152
60	Estados Unidos de América	311 666	3 069	9 847
<b>86</b>	<b>México</b>	<b>108 555</b>	<b>460</b>	<b>4 263</b>
96	Francia	62 036	204	3 284
104	Turquía	73 914	232	2 890
145	Sudáfrica	49 668	50	1 007

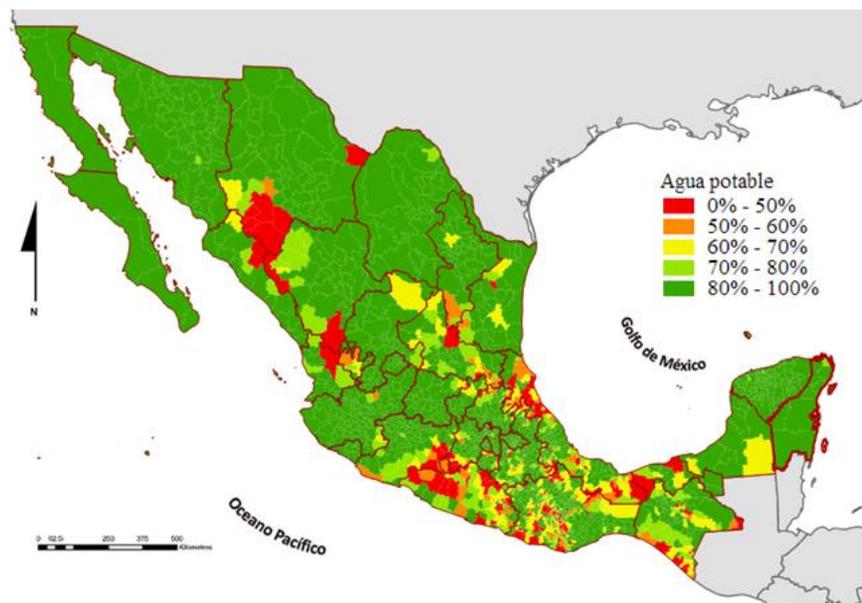
*Tabla 1.1. Países con mayor agua renovable per cápita, 2010*  
 Fuente: CONAGUA (2011b)

Según este criterio, México se encuentra en el lugar número 86 sobre 177 países de los cuales se dispone de información, como se observa en la Tabla 2.1.

Lo anterior hace hincapié en que la disponibilidad de agua depende en gran medida de la población, y teniendo en cuenta que la población ha aumentado drásticamente de 2 529 a 6 909 millones de personas en los últimos 60 años (CONAGUA 2011b) se vuelve aún más necesaria la búsqueda de fuentes alternas de agua dulce.

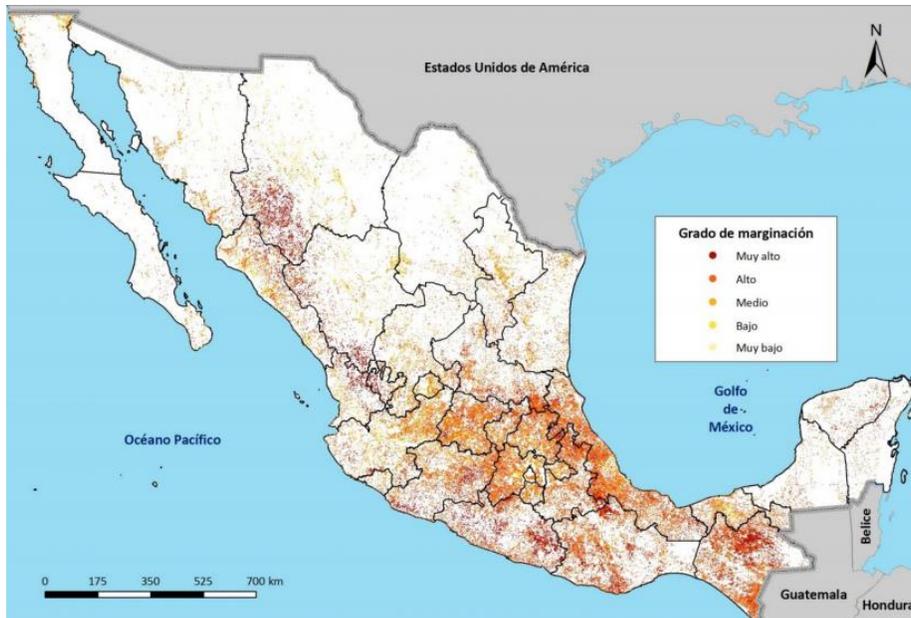
La destilación solar no compite con otras técnicas en cuanto a producción de agua, ya que demanda una gran cantidad de terreno, pero cuando la demanda de agua fresca es baja, es una opción viable que representa una excelente alternativa en regiones donde hay espacio y el acceso al agua potable está limitado por la falta de energía eléctrica y disponibilidad de fuentes de agua.

En México aún existen zonas donde la cobertura de agua potable es menor al 50%, la figura 1.1 muestra la distribución de los diferentes niveles de cobertura.



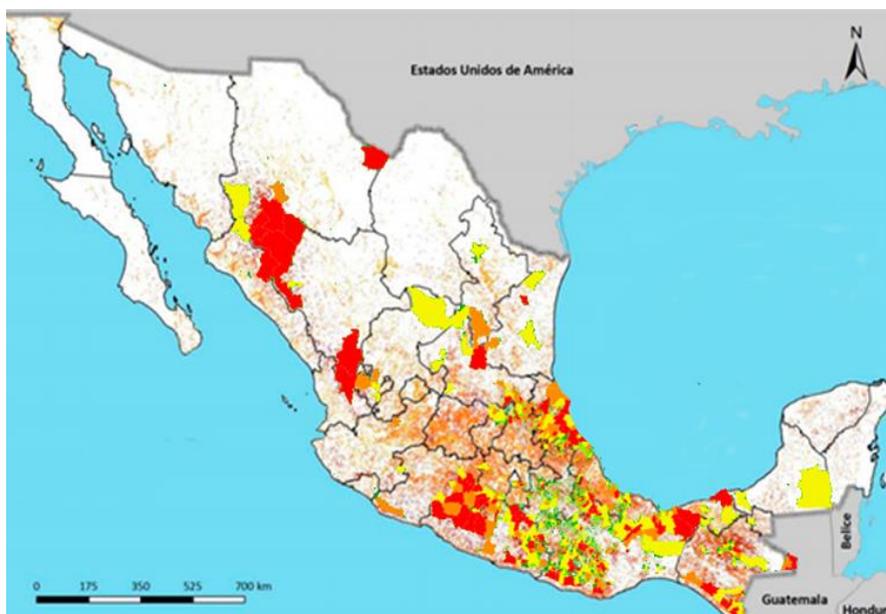
*Figura 1.2. Cobertura de agua potable*

Fuente: [http://www.conagua.gob.mx/atlas/mapa/28/index\\_svg.html](http://www.conagua.gob.mx/atlas/mapa/28/index_svg.html)



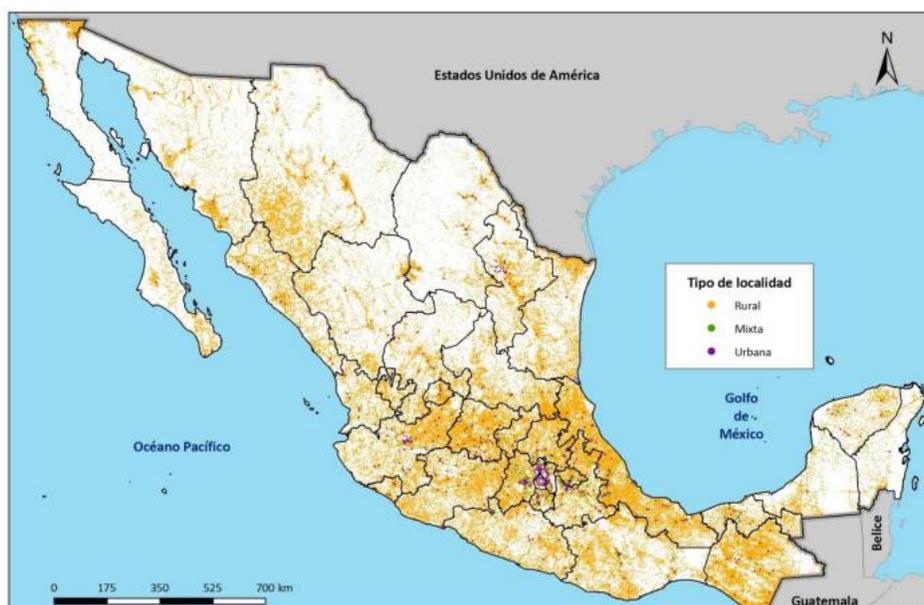
*Figura 1.3. Grado de marginación en México*  
 Fuente: <http://www.cepal.org>

Comparar los niveles de cobertura menores al 70%, con el grado de marginación en el país (figura 1.2) nos permite visualizar que las localidades más afectadas por la falta de agua potable son aquellas que no cuentan con los recursos para adquirirla (figura 1.3).



*Figura 1.4. Grado de marginación y cobertura de agua potable menor al 70%*  
 Fuente: Elaborada con datos de INEGI y CEPAL

De un total de 197, 154 localidades en todo el país, solo 3, 651 corresponden a localidades con más de 2500 habitantes, restando 193, 503 localidades con menos de 2500 habitantes (INEGI, 2010). Con la distribución esbozada en la figura 1.4 puede decirse que México está poblado por localidades rurales, localidades aisladas a las que les es más difícil instalar fuentes de agua potable tradicionales.



*Figura 1.5. Distribución de localidades rurales, urbanas y mixtas en México.*  
Fuente: <http://www.cepal.org>

México cuenta con 11, 122 km de litorales distribuidos en 17 estados, para los que el INEGI en su Censo de Población y Vivienda 2010 publicó los datos listados en la tabla 1.1, de los que cabe resaltar los altos porcentajes de población con acceso al agua. Sin embargo, la población censada por el INEGI con acceso sostenible a fuentes de agua, es la población perteneciente a localidades urbanas con más de 2500 habitantes.

<b>Estado</b>	<b>Litoral (km)</b>	<b>Población total</b>	<b>Población localidad &gt;2500 habitantes</b>	<b>Población localidad 1-2499 habitantes</b>	<b>Población acceso a agua* (%)</b>
Baja california	1,493	3,155,070	2,911,874	243,196	<b>97.6</b>
Baja california sur	2,131	637,026	548,718	88,308	<b>94.4</b>
Sonora	1,209	2,662,480	2,290,228	372,252	<b>97.4</b>
Sinaloa	622	2,767,761	2,015,767	751,994	<b>98.4</b>
Nayarit	296	1,084,979	748,034	336,945	<b>96.7</b>
Jalisco	351	7,350,682	6,365,434	985,248	<b>97.4</b>
Colima	142	650,555	577,539	73,016	<b>99.5</b>
Michoacán	228	4,351,037	2,988,349	1,362,688	<b>95.4</b>
Guerrero	522	3,388,768	1,971,848	1,416,920	<b>81.1</b>
Oaxaca	568	3,801,962	1,799,205	2,002,757	<b>85.5</b>
Chiapas	266	4,796,580	2,337,198	2,459,382	<b>87.5</b>
Quintana Roo	1176	1,325,578	1,168,520	157,058	<b>92.4</b>
Yucatán	340	1,955,577	1,642,756	312,821	<b>97.6</b>
Campeche	425	822,441	613,409	209,032	<b>92.4</b>
Tabasco	200	2,238,603	1,284,528	954,075	<b>91.2</b>
Veracruz	720	7,643,194	4,667,134	2,976,060	<b>90.9</b>
Tamaulipas	433	3,268,554	2,869,609	398,945	<b>97.9</b>

*Tabla 1.2. Población por tamaño de localidad y cobertura de agua, estados costeros*

Fuente: Elaborada con datos de INEGI (2010)

\*Proporción de la población con acceso sostenible a fuentes mejoradas de abastecimiento de agua en zonas urbanas y rurales de 2500 y más habitantes, 2010.

Enfocando la atención a los litorales del país la desalinización solar representa una excelente alternativa como fuente de agua dulce.

## 1.2 Hipótesis

La modificación del color y el tipo de fibra, así como la variación en la altura de las telas empleadas como sistema evapotranspirador en un destilador pasivo tipo invernadero, variará los volúmenes de destilado obtenidos de ellas.

## 1.3 Objetivo

Evaluar un sistema de destilación solar asistido con evapotranspiración usando materiales porosos, para la obtención de agua potable a partir de agua de mar, en casetas tipo invernadero.

### 1.3.1 Objetivos particulares

I. Evaluar la capacidad de producción de agua destilada al cambiar la coloración de la superficie de evapotranspiración.

*Hipótesis Alternativa:* La producción de agua destilada será mayor al utilizar telas color negro que con el color blanco.

*Hipótesis Nula:* La producción de agua destilada corresponde a la misma población, es decir, no habrá diferencias significativas entre la coloración blanca y negra de la superficie de evapotranspiración.

II. Estimar el volumen de destilado producido al cambiar la fibra textil utilizada como superficie de evapotranspiración.

*Hipótesis Alternativa:* La producción de agua destilada se verá influenciada por el nivel de absorción de agua de la fibra utilizada como superficie de evapotranspiración.

*Hipótesis Nula:* No existen diferencias significativas en la producción de agua referente a las diferentes fibras usadas.

III. Evaluar la capacidad de producción de agua destilada al variar la altura de la superficie de evapotranspiración.

*Hipótesis Alternativa:* La producción de agua destilada se incrementará linealmente con el incremento en la altura de tela expuesta.

*Hipótesis Nula:* La producción de agua destilada corresponde a la misma población, es decir, no habrá diferencias significativas al variar la altura de la superficie de evapotranspiración.

## CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

### 2.1 Clasificación del agua

El agua puede clasificarse con base en su contenido salino, el agua dulce difiere del agua de mar por la cantidad de sales que encontramos en ellas como muestra la tabla 2.2.

Tipo	Sólidos disueltos totales (SDT)
Agua dulce	Hasta 1,500
Agua salobre	1,500-10,000
Agua salada	>10,000
Agua de mar	10,000-45,000
Agua de mar estándar	35,000

Tabla 2.3. Clasificación del agua con base en el contenido de salinidad.  
Fuente: Cipollina, Micale, Rizzuti (2009)

A pesar de que puede considerarse dulce hasta los 1 500 mg/L, la normativa mexicana marca como límite máximo permisible para agua potable hasta 1 000 mg/L, la Organización Mundial de la Salud, se muestra accesible hasta los 1 500 mg/L ya que el sodio es un nutriente esencial y no cuentan con un valor de referencia para este (WHO 2011).

La salinidad del agua de mar varía entre 10,000 cerca de la desembocadura de grandes ríos y 45 000 ppm como el Golfo Pérsico e incluso en el Mar Muerto de hasta 370,000 ppm, pero se toma como referencia una salinidad de 35 000 ppm y su composición típica se muestra en la tabla 2.3. Los principales constituyentes químicos encontrados en el agua de mar son esencialmente sodio y cloruro que representan el 85% de los sólidos disueltos.

Ion químico	Concentración (ppm)	Porcentaje del contenido total de sales (%)
Cloruro Cl <sup>-</sup>	19,345	55.0
Sodio Na <sup>+</sup>	10,752	30.6
Sulfato SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,701	7.6
Magnesio Mg <sup>2+</sup>	1,295	3.7
Calcio Ca <sup>2+</sup>	416	1.2
Potasio K <sup>+</sup>	390	1.1
Bicarbonato HCO <sup>3-</sup>	145	0.4
Bromuro Br <sup>-</sup>	66	0.2
Borato BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>	27	0.08
Estroncio Sr <sup>2+</sup>	13	0.04
Fluoruro F <sup>-</sup>	1	0.003

*Tabla 2.4. Composición del agua de mar estándar*  
Fuente: Cipollina, Micale, Rizzuti (2009)

Las propiedades termodinámicas del agua de mar son muy diferentes de las del agua dulce como resultado de sus diferencias en composición. Esto resulta muy importante dado que se puede afectar el comportamiento del sistema purificador con cambios como la elevación del punto de ebullición o la presión osmótica. La tabla 2.5 muestra las principales propiedades termodinámicas para la composición estándar de agua de mar, salinidad de 35 000 mg/L a 20°C.

Debido a su contenido de sales el agua de mar no es apta para su consumo humano, entonces, si se requiere producir agua dulce a partir de agua salada se debe pensar en un proceso de separación adecuado. Esta tarea se puede lograr de muchas maneras, pero todas ellas basadas en el principio de que el agua y las sales no se separan espontáneamente y entonces se requiere de algún tipo de fuente de energía para alimentar el proceso de separación.

Propiedad termodinámica		Unidades
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1.024	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad (kg/ms)	1.074x10 <sup>-3</sup>	kg/m*s
Calor específico (kJ/kg°C)	3.998	kJ/kg°C
Presión osmótica (bar)	27	kPa
Elevación del punto de ebullición, 20°C	0.32	°C
Elevación del punto de ebullición, 100°C	0.51	°C

Tabla 2.5. Propiedades termodinámicas del agua de mar con 35 000 mg/L a 20°C  
Fuente: Cipollina, Micale, Rizzuti (2009)

## 2.2 Proceso de desalinización

Las tecnologías de desalinización pueden ser clasificadas de acuerdo a tres criterios (Cipollina, *et al.*, 2009):

- (1) Qué es lo que se extrae.
- (2) Qué proceso de separación se utiliza.
- (3) Qué tipo de energía se usa.

Dentro de la primera clasificación se encuentran dos grupos principales:

- (i) Procesos en los que el agua es separada de la corriente principal.
- (ii) Procesos en los que las sales son removidas de la corriente principal dejándola libre de sales.

La figura 2.2 ilustra como los procesos convencionales pueden ser clasificados de acuerdo a lo anterior.

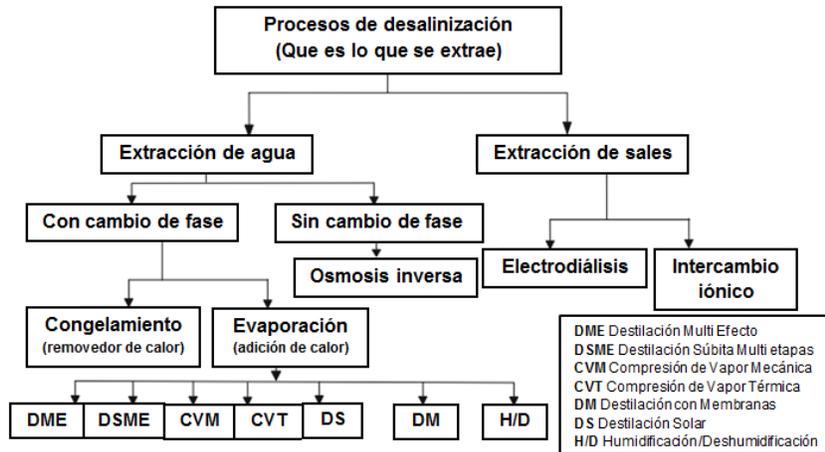


Figura 2.6. Clasificación de las tecnologías de desalinización.  
Fuente: Cipollina, Micale, Rizzuti (2009)

### 2.2.1 Tecnologías para la extracción de sales

En las tecnologías que se basan en la extracción de sales tenemos a la electrodiálisis y el intercambio iónico. La electrodiálisis consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través de una solución iónica, donde los iones positivos migrarán hacia el electrodo negativo, mientras que los iones negativos lo harán hacia el electrodo positivo. Entre ambos electrodos se colocan dos membranas semipermeables que permiten selectivamente solo el paso del  $\text{Na}^+$  o del  $\text{Cl}^-$ , entonces, el agua contenida en el centro de la celda electrolítica se desaliniza progresivamente, obteniéndose agua dulce.

En el intercambio iónico se utilizan resinas con las que se cambian los cationes disueltos en el agua por iones  $\text{H}^+$  y los aniones por iones  $\text{OH}^-$ , esos se van a recombinar para producir nuevas moléculas de agua, cuando la resina se satura, es decir todos los iones  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$  han sido sustituidos como en la figura 2.3.b, se puede regenerar para hacer del intercambio iónico un proceso cíclico y no continuo.

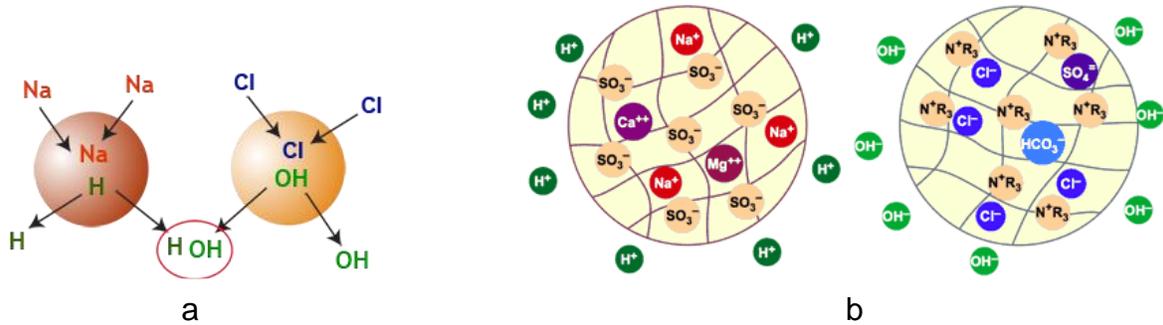


Figura 2.7. a) Proceso de intercambio iónico; b) Resina saturada  
 Fuente: [http://dardel.info/IX/IX\\_Intro\\_ES.html](http://dardel.info/IX/IX_Intro_ES.html)

### 2.2.2 Tecnologías para la extracción del agua

Los procesos que implican la extracción del agua se clasifican según si implican o no un cambio de fase. En los que no implican un cambio de fase encontramos a la ósmosis inversa. Este proceso obtiene agua potable a partir del agua con sales utilizando presión para forzar el agua a través de una membrana semipermeable, dejando atrás las sales disueltas en el lado de alimentación y se expulsan del dispositivo de ósmosis inversa en forma de solución concentrada de salmuera.

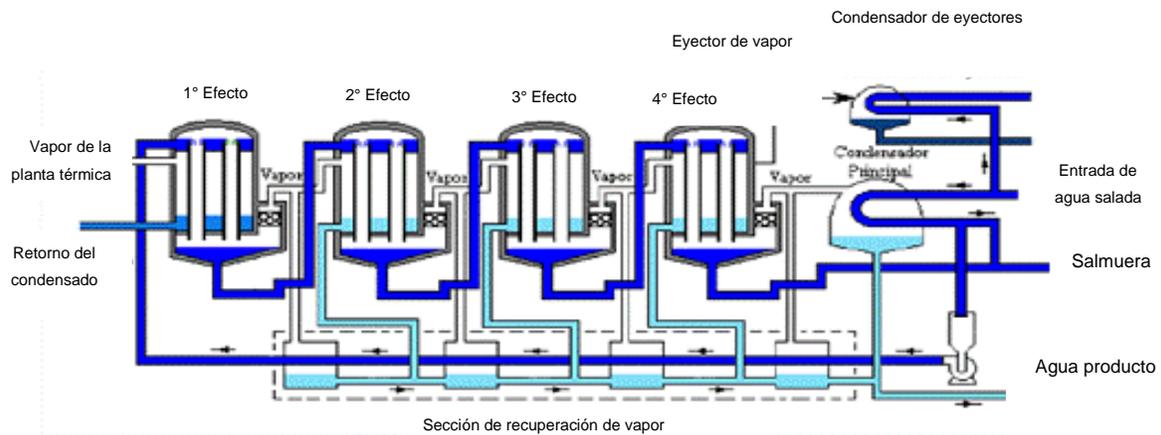
Los procesos con cambio de fase requieren un intercambio de calor que produce la separación de las sales y el agua. Estos procesos se dividen a su vez en dos grupos, los que requieren un suministro de calor y los que implican retirarlo.

El congelamiento implica retirar el calor. Se disminuye la temperatura de la solución hasta que se forma el sólido y este se separa del líquido residual. Al fundir este sólido se obtiene el agua pura. Este proceso requiere una cantidad de energía menor a la necesaria para vaporizar el agua y puede observarse naturalmente en el planeta ya que el agua congelada en los polos es dulce y al derretirse puede ser utilizada para consumo humano.

En la evaporación el objetivo es añadir calor al agua de mar para llevarla a ebullición y a continuación condensar el vapor, lo que proporciona agua dulce de

gran pureza. Las aguas no evaporadas en el proceso aumentan progresivamente su concentración salina, y forman una salmuera residual desechable. En la sección de evaporación podemos encontrar procesos como la Destilación de Múltiple Efecto (DME), Destilación Súbita de Múltiples Etapas (DSME), Compresión de Vapor Mecánica (CVM) y Térmica (CVT), Destilación con Membranas (DM) y la Destilación Solar (DS).

La DME consiste en evaporar en etapas sucesivas (figura 2.4). La primera etapa es alimentada con vapor externo y en el resto de las etapas se va utilizando el calor de condensación del vapor producido por la etapa anterior. Simultáneamente, el condensado de agua desalada va perdiendo temperatura hasta igualar, en la salida del proceso, a la del mar.



*Figura 2.8. Operación de un destilador de múltiple efecto*

Fuente: <http://www.emagister.com/curso-agua-desalacion-1-4/destilacion-8220-multiple-efecto-8221-med>

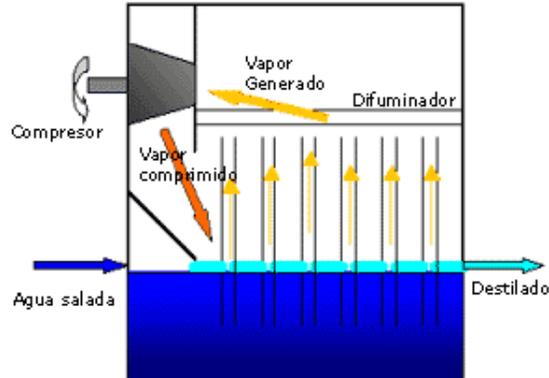
El agua de mar que se alimenta al proceso es precalentada en la etapa de condensación del vapor generado en el último efecto, ingresa al primer efecto en donde se eleva su temperatura al punto de ebullición con vapor de calefacción. El agua de mar se rocía sobre la superficie de los tubos del evaporador para su ebullición y evaporación. El vapor producido es colectado en este efecto y enviado al efecto siguiente, el cual opera a una temperatura y presión inferiores a las del

anterior. La salmuera proveniente del primer efecto es también enviada al efecto siguiente repitiendo el proceso de evaporación. El vapor de cada uno de los efectos se convierte así en agua desalada al ser condensado en el evaporador del efecto siguiente.

La DSME utiliza el mismo principio que la DME pero cambiando la manera en que se realiza la evaporación. En este proceso el agua de mar es precalentada a temperatura de ebullición en una cámara de vacío, después se alimenta a una cámara flash a través de un orificio de tal manera que se provoca una caída de presión suficiente para que sea menor a la de saturación a esa temperatura, evaporando parte del agua salada. Este vapor es condensado luego sobre la superficie de tubos que alimentan el agua de mar a la planta.

Solo un pequeño porcentaje del agua se evapora, de forma que la producción de la planta se logra mediante la operación de varias etapas que funcionan a presiones que se van reduciendo progresivamente.

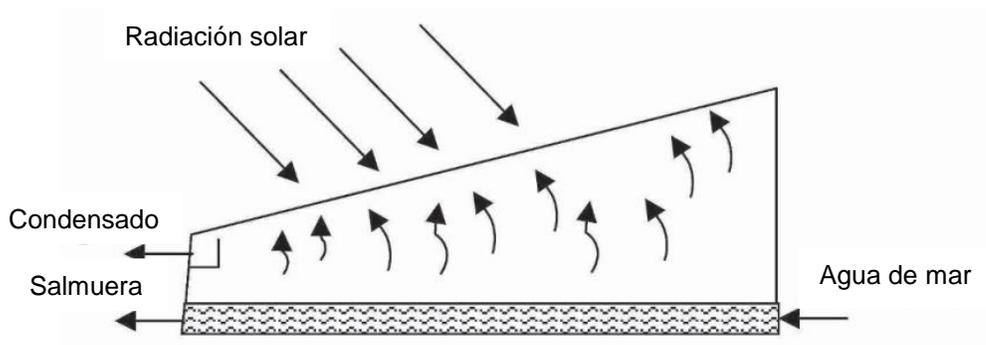
La destilación por compresión de vapor puede ser mecánica (CVM) o térmica (CVT), según el tipo de energía que emplea para comprimir el vapor de agua se considera mecánica si usa un compresor mecánico (figura 2.5) y térmica si usa un eyector de vapor en el último efecto. En este proceso se genera un flujo de vapor desde el sector de mayor presión y temperatura de condensación hacia el inferior, lugar donde se produce la condensación, es decir el agua salada se evapora en un lado de la superficie de intercambio y se comprime lo suficiente para que condensen en el otro lado, esto permite que pueda mantenerse el ciclo de destilación de agua salvando parte de las pérdidas del proceso.



*Figura 2.9. Destilación por compresión mecánica de vapor*  
 Fuente: [http://www.acquamatter.com/desalacion\\_del\\_agua.htm](http://www.acquamatter.com/desalacion_del_agua.htm)

En la destilación con membranas el agua salada se calienta y se expone a una membrana hidrófoba que permite el paso del vapor pero no del agua. Después de atravesar la membrana el vapor se condensa sobre una superficie más fría, para producir agua desalada. En estado líquido, esta agua no puede retroceder atravesando la membrana por lo que es recogida y conducida hacia la salida.

Otro de los procesos de extracción de agua con cambio de fase es la destilación solar. Donde el agua absorbe la energía solar y como resultado se forma vapor de agua fresca que condensa en el interior de la cubierta y se recoge en un canal lateral.



*Figura 2.10. Esquema del destilador solar simple*  
 Fuente: Eettouney, Rizzuti (2006)

Los procesos de desalinización de agua han sido estudiados por más de un siglo, se ha intentado hacerles modificaciones incluso combinarlos entre ellos, todo con el fin de minimizar costos y hacerlos más eficientes en cuanto a la producción de agua; sin embargo, en su mayoría son procesos dependientes de los combustibles fósiles (Tinu, Amit; 2011) que además de encarecer los procesos provocan un daño al medio ambiente, pero, podrían volverse un proceso sustentable si se cambia su fuente energética.

Entre las potenciales fuentes de energía están la solar, eólica, geotérmica, oceánica, biomasa (Jijakli et al., 2012), incluso la utilización de energía procedente de otros procesos como lo hacen la DME y DSME. Todas estas fuentes de energía son aplicables, sin embargo, solo la energía solar tiene la ventaja de que toma directamente el calor del sol, además de que es un proceso de uso simple.

## **CAPÍTULO 3**

### **DESTILACIÓN SOLAR**

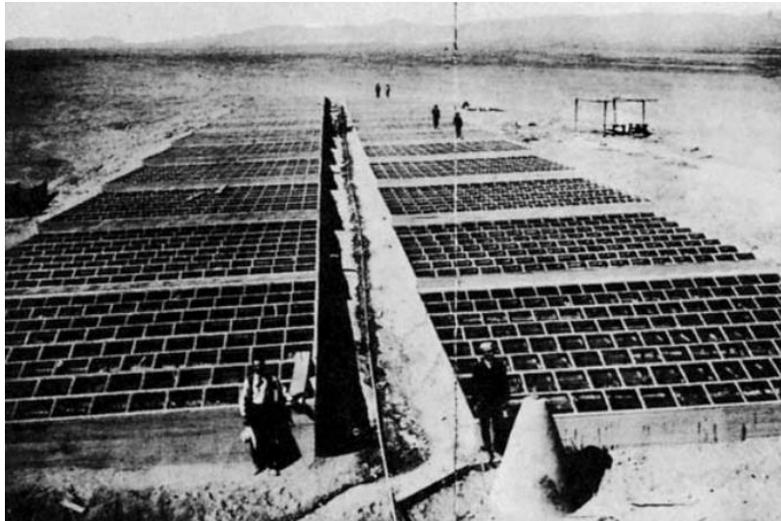
#### **3.1 Historia de la destilación solar**

La destilación solar fue uno de los primeros procesos empleados para producir agua fresca a partir de agua salada. Este proceso se basa en el uso de la energía térmica solar para evaporar agua, separando así agua pura y salmuera.

Se ha empleado desde hace mucho tiempo. Sin embargo, el acontecimiento que enmarca la justificación de la desalinización solar, fue descrito por Alejandro de Afrodisia en el año 200, donde producto de la necesidad de agua dulce, los marineros en sus viajes hervían el agua de mar y recuperaban el vapor producido con esponjas que colocaban en la boca del recipiente, encontrando, que el agua en la esponja era dulce.

En 1870 se les concedió a Wheeler y Evans la primera patente americana en la destilación solar y se les atribuye el conocimiento sobre el funcionamiento básico de los destiladores solares. Los inventores describen el efecto invernadero, se analiza en detalle la condensación y re-evaporación, discutieron la absorción de la superficie oscura y la posibilidad de problemas de corrosión. (Kalogirou, 2005)

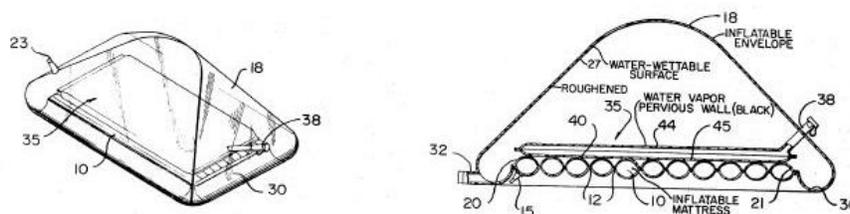
Dos años después, la primera planta convencional de destiladores solares “Las Salinas” fue construida por el ingeniero Charles Wilson en Chile (figura 3.1), la cual consistía en 64 bahías con un área superficial de 4450 m<sup>2</sup> y capacidad total de producción de 22.7 m<sup>3</sup>/día (Delyannis, 2003). Esta planta operó durante 40 años abasteciendo a una comunidad minera, hasta que cesaron los trabajos en las minas.



*Figura 3.1. Planta “Las Salinas”, Chile.  
Fuente: Delyannis (2003)*

El interés en la desalinización solar creció durante la segunda guerra mundial, cuando cientos de soldados al norte de África o en las islas del Pacífico sufrían por la falta de agua fresca, fue entonces cuando un equipo en el Instituto de Tecnología de Massachusetts dirigido por Maria Telkes comenzaron experimentos con destiladores solares.

Telkes (1956) diseñó un pequeño destilador solar plástico inflable para ser utilizado por balsas salvavidas de buques y aeronaves de las que se produjeron cientos de miles (figura 3.2).



*Figura 3.2. Destilador portátil patentado por Telkes*

La explosión de la población y la tremenda expansión de la industria después de la Segunda Guerra Mundial, trajo de nuevo el problema de agua de buena calidad. Problema que actualmente sigue latente y que ha enfocado a la comunidad

científica en la búsqueda de procesos eficientes de obtención de agua fresca, por lo que, sin embargo, de los aproximadamente 22 millones de m<sup>3</sup> de agua dulce que se producen diariamente por procesos de desalinización en todo el mundo, menos del 1% se realiza mediante energía solar (Kalogirou, 2009). La desalinización solar ha perdido la atención frente a los métodos prevaletentes que son DSME y la ósmosis inversa, pero, dado que consumen mucha energía y dependen en gran medida de los combustibles fósiles, emplear la destilación solar sigue siendo aún una excelente alternativa.

### **3.2 Clasificación de los sistemas de destilación solar**

Los sistemas de destilación solar son comúnmente clasificados como directos o pasivos e indirectos o activos. La figura 3.3 muestra esta clasificación.

En los destiladores pasivos, la radiación solar es recibida directamente por el agua, es decir, la energía que alimenta al sistema es solamente la que incide directamente por las paredes del destilador sin un alimentador externo de energía; consecuentemente la evaporación deja una baja productividad reportando eficiencias entre 30 y 45% (Kabeel, 2011). Con el fin de superar este problema, fueron desarrollados los destiladores activos donde incrementan la cantidad de energía disponible para el sistema en comparación con los destiladores pasivos. La destilación indirecta incluye colectores solares, energía eléctrica, turbinas o celdas fotovoltaicas que si bien incrementan la eficiencia de los destiladores vuelven más elevados los costos.

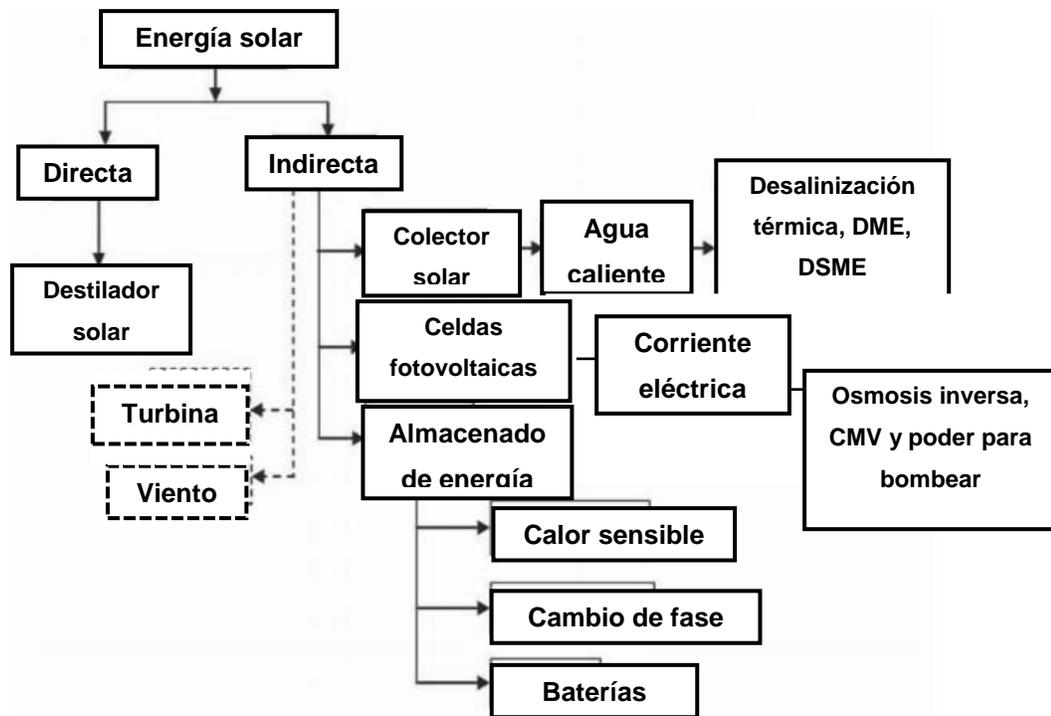


Figura 3.3. Clasificación de destilación solar directa e indirecta.  
Fuente: Cipollina, Micale, Rizzuti (2009)

Resulta entonces necesario buscar modificaciones a los destiladores pasivos que no incrementen ni el precio ni la complejidad en su uso para mantenerlo accesible para todas las personas. Otro de los inconvenientes más conocidos para el uso de los destiladores es su gran demanda de terreno, pero si consideramos que puede usarse en pequeña escala y sin requerir energía eléctrica, es una excelente alternativa para ayudar a las familias que no tienen acceso a una fuente de agua confiable.

### 3.3 Transferencia de masa y calor

Dos fenómenos físicos tienen lugar en un destilador solar:

- [1] Transferencia de masa entre el agua en las charolas y la superficie interior del techo donde condensa.
- [2] Transferencia de calor entre los dos componentes

La transferencia de masa es debida a la evaporación del agua en la charola; el vapor de agua fluye a través del aire y condensa sobre el techo del destilador. El calor es transferido de tres formas, por convección libre del aire húmedo entre el agua y la superficie de vidrio dentro del destilador, por radiación entre las mismas superficies y por intercambio de energía durante el proceso de evaporación-condensación enlazado con la transferencia de masa (García et al., 2007).

El calor transferido por convección libre de aire húmedo ( $q_{cw}$ ;  $W/m^2$ ) entre el material del techo y la superficie del agua dentro del destilador, es proporcional a la diferencia de sus temperaturas,  $T_w$  y  $T_g$  respectivamente:

$$q_{cw} = h_{cw}(T_w - T_g) \quad \text{Ec. 3.1}$$

Para las condiciones normales de radiación solar y temperatura en un destilador solar, Dunkle obtuvo la expresión para el coeficiente de transferencia de calor por convección libre  $h_{cw}$ .

$$h_{cw} = 0.884 \left[ \frac{(P_w - P_g)(273 + T_w)}{268.9(10^3) - P_w} + (T_w - T_g) \right]^{1/3} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Así que la velocidad de transferencia de calor por convección es:

$$q_{cw} = 0.884 \left[ \frac{(P_w - P_g)(273 + T_w)}{268.9(10^3) - P_w} + (T_w - T_g) \right]^{1/3} (T_w - T_g) \quad \text{Ec. 3.3}$$

La velocidad de transferencia de calor de la superficie del agua a la cubierta ( $q_{ew}$ ;  $W/m^2$ ) dada la transferencia de masa evaporada es:

El flujo másico multiplicado por el calor latente de vaporización

$$q_{ew} = m_w \lambda \quad \text{Ec. 3.4}$$

La transferencia de calor puede ser calculada multiplicando el coeficiente equivalente por la transferencia por evaporación ( $h_{ew}$ ) por la diferencia de presiones parciales del vapor de agua a las temperaturas del agua y de la cubierta

$$q_{\epsilon w} = h_{\epsilon w}(P_w - P_g) \quad \text{Ec. 3.5}$$

Malik et al., (1982) obtuvo una relación entre los coeficientes de transferencia de calor por convección y por evaporación:

$$\frac{h_{\epsilon w}}{h_{cw}} = 16.273(10^{-3}) \quad \text{Ec. 3.6}$$

De la transferencia de masa, la producción de agua destilada por hora y  $m^2$  se expresa:

$$m_w = \frac{q_{\epsilon w}}{\lambda} 3600 \quad \text{Ec. 3.9}$$

Donde:

- $q_{cw}$  calor transferido por convección libre de aire húmedo ( $W/m^2$ )
- $P_w$  presión de vapor saturado del agua a la temperatura del agua en la charola (Pa)
- $P_g$  presión de vapor saturado del agua a la temperatura del vidrio (Pa)
- $q_{\epsilon w}$  velocidad de transferencia de calor de la superficie del agua a la cubierta ( $W/m^2$ )
- $h_{\epsilon w}$  transferencia por evaporación ( $W/m^2 K$ )
- $m_w$  flujo de masa (kg/m)
- $\lambda$  calor latente de vaporización (J/kg)

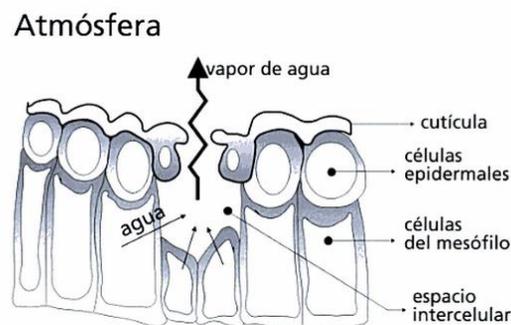
## CAPÍTULO 4

### EVAPOTRANSPIRACIÓN EN DESTILACIÓN SOLAR

El proceso mediante el cual las plantas pierden agua se conoce como evapotranspiración (ET). La ET es la combinación de dos procesos, evaporación y transpiración. Donde, el agua se transfiere a la atmósfera a través del suelo por evaporación y mediante la transpiración del cultivo.

En la evaporación el agua líquida se convierte en vapor utilizando como fuente de energía la radiación solar directa y la temperatura ambiente del aire.

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. En una planta el agua se pierde a través de las estomas (figura 2.15), que son pequeñas aberturas en las hojas por las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta a la atmósfera. El agua junto con los nutrientes del suelo son absorbidos por las raíces y transportados a través de la planta; casi toda el agua que se absorbe se pierde por transpiración y la otra fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales.



*Figura 4.1. Representación esquemática de una estoma*

Fuente: Allen et al., 2006

El agua es transportada desde la raíz gracias a la transpiración y a la capilaridad.

La capilaridad es la propiedad que tienen los líquidos de ascender o descender en el interior de tubos de diámetro pequeño cuando estos se introducen en la masa del líquido. Es un fenómeno que se debe a dos fuerzas: la adhesión que es la fuerza de atracción entre el agua y las paredes del canal a través del cual se mueve y la cohesión que es la tensión superficial del agua que es debida a la elevada atracción entre las moléculas de agua.

Cabe resaltar que en las plantas la capilaridad no es el único factor que influye en la altura que el agua asciende desde las raíces hasta las hojas, depende también de otros elementos que no son concernientes a este trabajo.

Cuando se introduce en un líquido un tubo capilar, el líquido asciende hasta alcanzar la altura H. La ley de Jurín muestra claramente que la altura de ascenso en el capilar es proporcional a la tensión superficial del líquido e inversamente proporcional a su densidad y al radio del tubo capilar:

$$H = \frac{2\sigma}{R\rho_w g} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde:

- H es la altura de ascenso por un capilar [m]
- $\sigma$  es la tensión superficial del agua [0.0727 J m<sup>-2</sup> a 20°C]
- R el radio capilar [m]
- $\rho_w$  la densidad del agua [998 kg m<sup>-3</sup>]
- g es la constante de la aceleración de la gravedad [9.81 m s<sup>-2</sup>]

Al desarrollar el proceso de Evapotranspiración dentro de un sistema de destilación solar aplicado en un dispositivo piloto de pruebas experimentales, se obtuvieron resultados positivos.

Este sistema que utiliza la evapotranspiración tiene como propósito emplear fuerzas de capilaridad, cohesión y adhesión para formar delgadas láminas de agua aumentando así el área superficial de evaporación del destilador solar, logrando la producción de mayor cantidad de agua en la misma superficie de terreno.

En los trabajos realizados por Silva Martínez (2012) se obtuvo el área de telas de algodón con las que se incrementó la producción de agua destilada. Este incremento se mostró desde los 6 m<sup>2</sup> hasta 8.5 m<sup>2</sup> de área de evapotranspiración y, posteriormente, comienza a reducirse la producción de agua debido al efecto de sombreado y la subsecuente disminución de temperatura en las canaletas de evaporación sombreadas. Seleccionando los 6 m<sup>2</sup> de área de evapotranspiración que corresponden a 4 lienzos de tela de 1.2 por 1 m.

## **CAPÍTULO 5**

### **FIBRAS TEXTILES**

Las fibras textiles son todos aquellos materiales que se pueden hilar o utilizar para fabricar telas mediante operaciones de trenzado, fieltado o tejido. Una fibra es un sólido relativamente flexible, microscópicamente homogéneo, con una pequeña sección transversal y una elevada relación longitud-anchura.

Todos tienen como base dos tipos de fibras: naturales y artificiales.

La combinación de fibras naturales y artificiales produce fibras mixtas que ofrecen las mejores cualidades de ambas. Existe una variedad muy grande de géneros fabricados con fibras mixtas y cada uno de ellos se comporta de modo diferente.

Las fibras naturales, se encuentran en la naturaleza y son extraídas mediante procesos físicos o mecánicos. Según su origen pueden ser:

- a) Vegetales
- b) Animales
- c) Minerales

Las fibras manufacturadas o químicas, son hechas por el hombre y pueden ser obtenidas de polímeros naturales o de polímeros sintéticos, las primeras son generalmente conocidas como fibras artificiales y las segundas se denominan sintéticas.

Las fibras químicas fueron creadas inicialmente con un solo objeto: servir de ayuda a las fibras naturales, ya sea en periodo de escasez o de elevado coste (Fidel, 2013).

Entre esta variedad y dados los fines de este proyecto se pueden descartar las que son resistentes al agua, las que se alteran con la humedad y los microorganismos y las que pierden resistencia al ser expuestas a la luz solar, quedando como posibilidades las enlistadas en la siguiente tabla:

Fibras naturales		Aplicable
Vegetal	Abacá	Si
	Algodón	Si
	Bonote	Si
	Cáñamo	Si
	Capoc	Si
	Esparto	No
	Formio	Si
	Henequén	No
	Kenaf	No
	Lino	Si
	Ramio	Si
	Sisal	No
	Yute	No
	Animal	Alpaca
Angora		No
Caballo		No
Cabra		No
Camello		No
Conejo		No
Lana		Si
Llama		No
Mohair		No
Seda		No
Seda Tussah		No
Vicuña		No
Yak		No
Mineral	Amianto (Asbesto)	No

*Tabla 5.1. Fibras naturales aplicables en el proyecto*

Fuente: Elaborado con datos de Pineda (2010), <http://www.financiarural.gob.mx>

y <http://www.utm.mx>

Fibras manufacturadas		
Artificiales	Acetato	Si
	Alginato	No
	Caucho natural	No
	Cupro	Si
	Lyocell	No
	Modal	Si
	Triacetato	No
	Viscosa	Si
Sintéticas	Acrílico	No
	Alcohol polivinilico	No
	Aramida	No
	Clorofibra	No
	Elastano	No
	Elastodieno	No
	Elastolefina	No
	Elastomultiéster	No
	Fluorofibra	No
	Melamina	No
	Modacrílico	No
	Poliamida	No
	Poliéster	No
	Polietileno	No
	Polilactida	No
	Polimida	No
	Polioxamida	No
Polipropileno	No	
Inorgánicas	Vidrio	No
	Metal	No
	Carbón	No
	Cerámica	No

*Tabla 5.2. Fibras manufacturadas aplicables en el proyecto*

Fuente: Elaborado con datos de Pineda (2010)

Las propiedades más comunes de las fibras sintéticas son su sensibilidad al calor, resistencia a los agentes químicos, buena resistencia a la luz solar, son fibras muy livianas, resistentes a microorganismos, alta absorción de grasas y aceites, sin embargo, presentan una baja absorción de agua (Pineda; 2010), pueden considerarse hidrofóbicos (Billmeyer, 1975).

Las fibras inorgánicas son usadas por su dureza, la fibra de vidrio es usada para reforzar fibras sintéticas además como aislante térmico, eléctrico y acústico. Las fibras de metal suelen usarse también para reforzar otras fibras, sin embargo, su uso en la confección es de carácter decorativo. (Pineda, 2010)

La fibra de abacá y el bonote presentan características adecuadas ya que son higroscópicas y además resistentes al agua de mar, sin embargo, son más ampliamente usadas para la fabricación de sogas, cordeles, líneas de pesca, redes y sacos; lo que los vuelve inapropiados para el fin de este trabajo.

De las fibras susceptibles a ser empleadas en este trabajo, basados en sus propiedades de absorción, la fibra con mejor potencial es la viscosa ya que puede llegar a absorber hasta el 100% de su peso en agua, seguida por el lino con un 60%, algodón 50%, lana 45% y finalmente el acetato con un 25%.

El mecanismo de transferencia de calor en una fibra textil es un fenómeno complicado ya que intervienen los mecanismos de conducción, convección y radiación, pero, se considera que la conducción es la más significativa de todas. Las propiedades térmicas de las telas se ven influenciadas por muchos factores, como son: las características morfológicas de los componentes, la estructura y propiedades del hilado y las características físicas y estructurales de la tela.

## **5.1 Color**

Atribuimos al color la sensación que recibimos cuando nuestro sentido de la vista es excitado por una radiación luminosa no blanca, el cual existe en nuestra mente

y no en la realidad material, siendo, por tanto, en gran parte una sensación subjetiva. Decimos que la luz blanca es incolora, no produce sensación de color, siendo nuestros órganos visuales incapaces de hacer un análisis espectral de ella.

El color de la luz emitida por un cuerpo en la oscuridad depende de la longitud de onda de la radiación que a su vez, es función de la temperatura. Un cuerpo emite radiaciones de muy diversas longitudes de onda, pero para cada temperatura predomina una radiación de máxima energía (radiación por emisión).

Por otro lado, decimos que un objeto tiene un color cuando, con preferencia, refleja o transmite las radiaciones correspondientes a tal color. Un cuerpo es rojo por reflexión o por transparencia cuando absorbe en casi su totalidad, todas las radiaciones menos las rojas, las cuales refleja o se deja atravesar por ellas. Si tal cuerpo rojo está situado en la oscuridad se ilumina con luz verde da la sensación al ojo de ser negro.

En consecuencia podemos decir que en general, el color de los cuerpos no es una propiedad intrínseca de ellos, sino que va ligado con la naturaleza de la luz que reciben.

La luz blanca es la constituida por un espectro continuo que recoge los colores básicos de la naturaleza y en el que ninguna frecuencia predomina por su intensidad

Un cuerpo blanco perfecto es aquel que al recibir radiaciones visibles, las refleja en todas direcciones, sin absorber energía radiante.

Cuando los rayos del sol inciden sobre la superficie, la cantidad de calor transmitido a dicha superficie dependerá básicamente de dos factores:

- 1) Grado de opacidad, color y rugosidad de la misma.
- 2) Ángulo de incidencia.

Una superficie de color oscuro absorberá más calor radiante que una superficie de color claro, en igual forma una mayor rugosidad favorece la absorción de calor. La

tabla siguiente muestra los conceptos aproximados de radiación solar absorbidos por superficies de diferente color (Díaz, 2005).

Color de superficie		Calor radiante absorbido (%)
Blanco o aluminio	Color claro	28
Rojo, marrón, verde claro	Color mediano	63
Negro o verde oscuro	Color oscuro	94

*Tabla 5.3. Calor radiante absorbido para superficies lisas*  
Fuente: Díaz (2005).

## CAPÍTULO 6

### RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es la energía emitida por el sol que se propaga en todas direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias. Las reacciones nucleares de fusión de hidrógeno que se producen en el sol son la fuente principal de energía en la atmósfera.

Estas reacciones son posibles debido a la muy elevada temperatura en su núcleo, que a su vez es consecuencia de las enormes presiones generadas por la atracción gravitatoria. Puede considerarse que el sol se comporta prácticamente como un cuerpo negro radiando la máxima cantidad posible correspondiente a 6000 K aproximadamente (Duffie, 1974). Con dicha temperatura el sol irradia en todas direcciones, propagándose en el vacío y transfiriendo su energía a la atmósfera y a la superficie terrestre mediante la absorción y dispersión de sus fotones.

En el vacío, las ondas electromagnéticas se mueven a la misma rapidez (a la velocidad de la luz,  $c$ ), y difieren entre sí por la frecuencia. La clasificación de estas ondas por su frecuencia constituyen el espectro electromagnético.

Las ondas electromagnéticas (figura 6.1) de varios miles de Hertz (kHz) se consideran ondas de radio de muy baja frecuencia, en el extremo menos energético. Un millón de Hertz (MHz) está a la mitad del cuadrante de un radio AM. La banda de TV, de ondas de muy alta frecuencia (VHF) comienza en unos 50 MHz y la radio FM va de 88 a 108 MHz. Después vienen las frecuencias ultra altas (UHF), seguidas de las microondas, más allá de las cuales están las ondas infrarrojas, que con frecuencia se llaman "*ondas caloríficas*". Todavía más adelante está la luz visible, la luz de frecuencia mínima que podemos ver a ojo es la roja, las frecuencias máximas de la luz visible tienen casi el doble de la frecuencia del rojo y son violeta. Las frecuencias todavía mayores son ultravioleta.

Esas ondas de mayor frecuencia son las que causan quemaduras al asolearse. Las frecuencias mayores que el ultravioleta se extienden hasta las regiones de los rayos X y los rayos gamma. (Hewitt 2004).

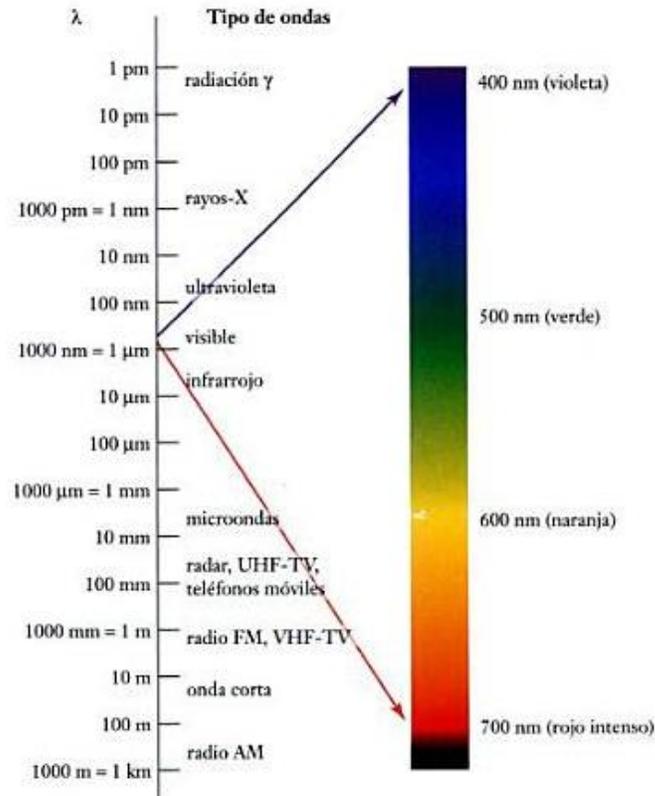
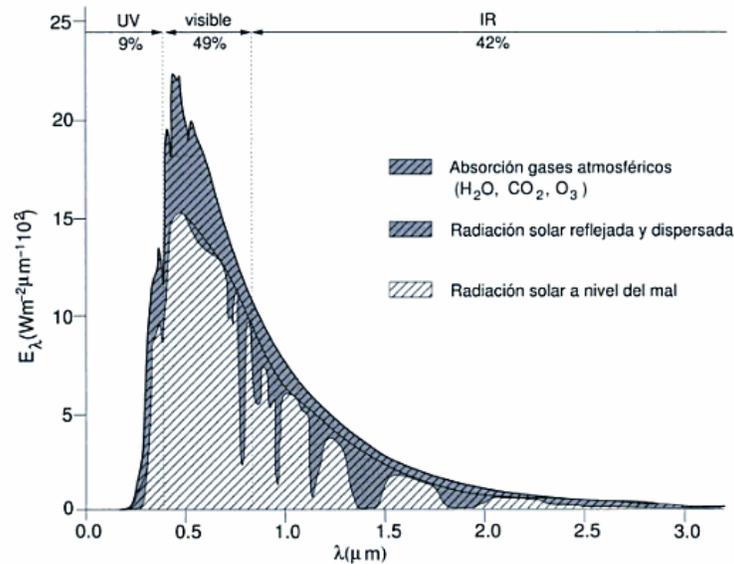


Figura 6.1. Espectro electromagnético y luz visible  
Fuente: American Chemical Society (2007).

La radiación que llega al borde de la atmósfera recibe el nombre de onda corta pues la distribución espectral de energías cae fundamentalmente en el rango de  $0 < \lambda < 4 \mu\text{m}$ , teniendo su máximo de emisión concentrada entre los  $0.4$  y  $0.7 \mu\text{m}$  del espectro, es decir, en el rango visible. Su máximo absoluto se encuentra en  $0.5 \mu\text{m}$  (Rodríguez, 1998).

De la radiación solar que llega al tope de la atmósfera, aproximadamente el 9% corresponde a la radiación ultravioleta ( $\lambda < 0.4 \mu\text{m}$ ), el 49% al visible ( $0.4 < \lambda < 0.7 \mu\text{m}$ ) y el 42% al infrarrojo ( $\lambda > 0.7 \mu\text{m}$ ).



*Figura 6.2. Distribución espectral de la radiación solar incidente en el tope de la atmósfera y al nivel del mar.*

Fuente: Hewitt (2004)

Desde que es emitida a la atmósfera solar, la distribución espectral y la intensidad de radiación que finalmente llega a la superficie terrestre se ve afectada por fenómenos astronómicos y por la interacción de la radiación solar con la atmósfera. En esta interacción en la que la radiación puede ser absorbida, dispersada o directamente reflejada, de la energía recibida en el tope de la atmósfera terrestre menos del 50% alcanza el suelo (figura 6.3) . Y puede verse afectada por las variaciones en la distancia entre la tierra y el sol, variaciones en la dispersión atmosférica del aire, vapor de agua y polvo, y, por la absorción atmosférica del  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$ .

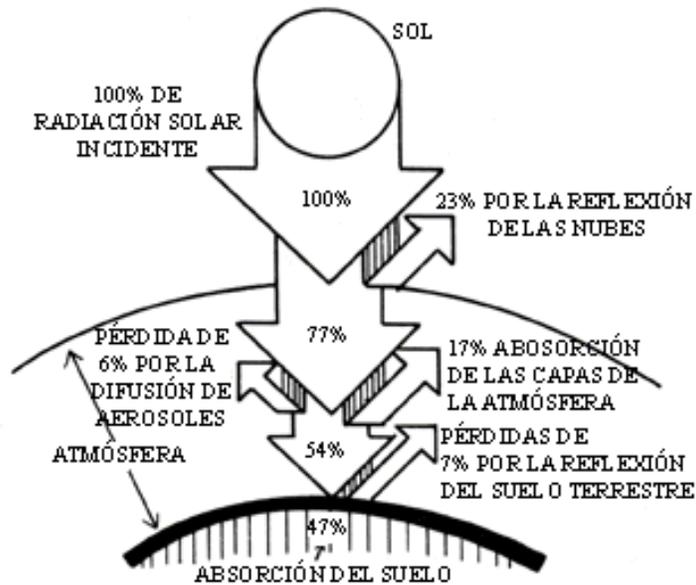


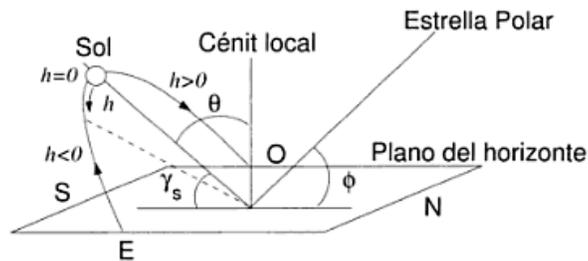
Figura 6.3. Balance energético de la radiación solar.  
 Fuente: [http://saecsaenergiasolar.com/renovables/energia\\_solar/](http://saecsaenergiasolar.com/renovables/energia_solar/)

Dada la lejanía del sol respecto del planeta Tierra podemos suponer que los rayos del sol inciden paralelos sobre el planeta. La cantidad de energía solar que alcanza una superficie horizontal en un lugar específico en cada instante se llama insolación. Teniendo en cuenta que la radiación emitida por una fuente esférica decrece con el cuadrado de la distancia al centro de la fuente, la insolación recibida a una altura a la que la radiación solar no se vea afectada por la atmósfera terrestre podrá expresarse como:

$$F_0 = S \left( \frac{R_{ST}}{R_{ST}} \right)^2 \cos \theta \quad \text{Ec. 6.1}$$

Donde  $\overline{R_{ST}}$  es la distancia media Sol-Tierra,  $R_{ST}$  es la distancia entre sus centros,  $\theta$  es el ángulo que forman los rayos del sol con la normal a la superficie en ese punto llamado ángulo cenital (figura 6.4) y  $S$  es la constante solar, que es la cantidad de energía que recibe, por unidad de tiempo y por unidad de área una superficie perpendicular a los rayos solares localizada en el borde exterior de la

atmósfera a la distancia media Tierra-Sol de  $1.496 \times 10^8$  km. El valor medido a esta distancia es  $1368 \text{ W/m}^2 \pm 7 \text{ W/m}^2$ .



*Figura 6.4. Relación entre el plano horizontal local y los rayos solares.*  
Fuente: Hewitt (2004)

Como es evidente, la radiación solar solo está disponible de día. Cuando mayor sea la duración del día mayor será la insolación recibida en un lugar determinado. Esta variable solo depende de la latitud y la época del año, en verano los días son más largos conforme nos acercamos al polo norte hasta durar 24 horas. Es decir, la máxima variación de insolación diaria ocurre en los polos, pues en invierno el Sol está debajo del horizonte y no se recibe ninguna energía radiante, mientras que en el verano el sol brilla durante 24 horas diarias.

La radiación solar incidente en una determinada área de la Tierra puede llegar a ella a través de varios caminos:

- Radiación solar incidente: es aquella que llega directamente a la superficie, no es reflejada ni dispersada.
- Radiación solar difusa: aquella que es dispersada a su paso por la atmósfera.
- Radiación solar reflejada: conocida también como albedo es aquella que es reflejada por el terreno y finalmente alcanza el área de medición.

La suma de estos tres componentes se conoce como radiación global, depende fundamentalmente de las condiciones atmosféricas locales, la composición de la

atmósfera del área de control, así como la reflectancia del terreno alrededor del sitio de medida.

El albedo de la superficie dependerá de la naturaleza del material, casi todas las superficies terrestres tienen albedos del orden de 0.1 a 0.3. El de la nieve pasa comúnmente de 0.8 y el del agua es menor de 0.1, algunos otros son descritos en la tabla 5.1.

Superficie	Albedo	Emisividad (todas las ondas)
Suelos	0.05-0.40	0.90-0.98
Desierto	0.20-0.45	0.84-0.91
Hierba	0.16-0.26	0.90-0.95
Cultivos agrícolas y tundra	0.18-0.25	0.90-0.99
Huertos	0.15-0.20	-
Bosques		
Caducifolios	0.15-0.20	0.97-0.98
De coníferas	0.05-0.15	0.97-0.99
Agua	0.03-0.10	0.92-0.97
Nieve		
Vieja	0.40	0.82
Reciente	0.95	0.99
Hielo		
Marino	0.33-0.45	0.92-0.97
De glaciares	0.20-0.40	

*Tabla 6.1. Propiedades radiantes de las superficies naturales*  
Fuente: Henry (1999)

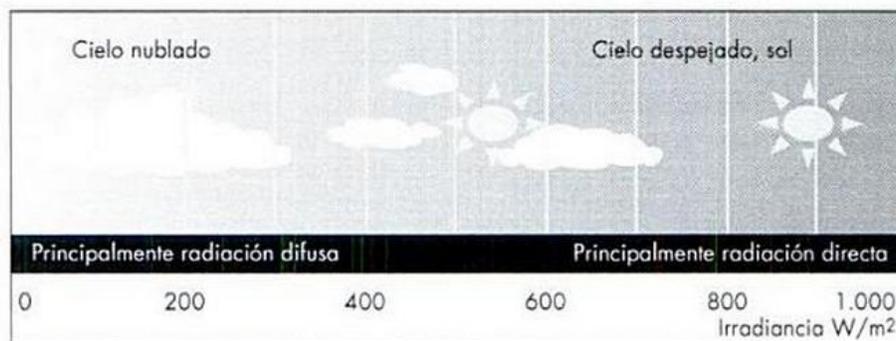
La parte de la radiación solar que es dispersada hacia la superficie terrestre, junto con la parte que directamente la alcanza, es reflejada según el albedo de la superficie y absorbida. Esta última aumenta su temperatura según su calor específico. Esta energía pues, pasa a formar parte de la energía interna del

sistema Tierra-atmósfera, que más tarde podrá ser utilizada mediante transformaciones a energía potencial, calor latente y energía cinética.

Parte de esa energía interna también será emitida en forma de radiación. Mientras el sol emite radiación de longitud de onda corta al espacio correspondiente a la radiación de un cuerpo negro a 6000 K, la superficie y la atmósfera de la Tierra radian también aproximadamente como un cuerpo negro pero con una temperatura de emisión muy inferior en torno a los 300 K.

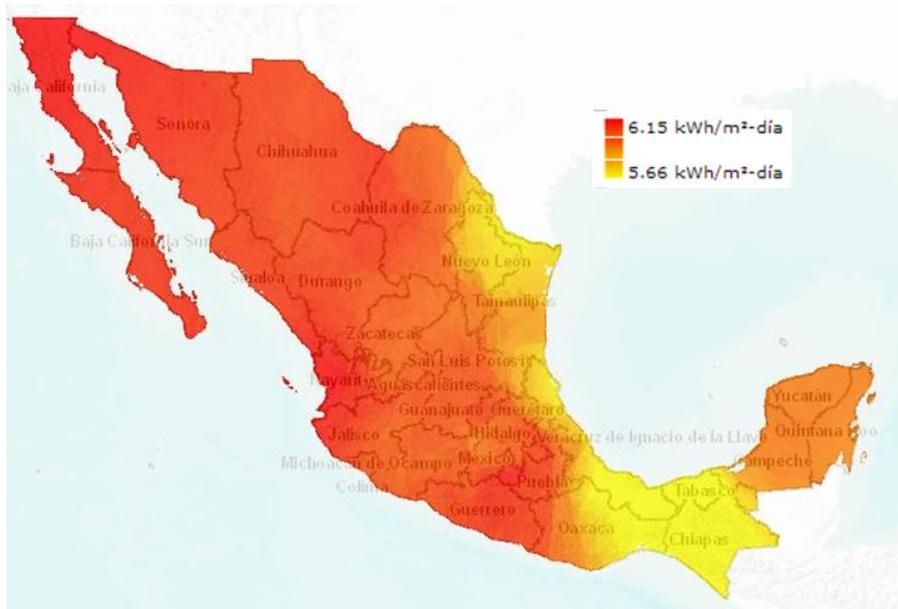
Aunque parte de la radiación solar es absorbida por los gases atmosféricos, es la radiación terrestre de onda larga la que calienta la atmósfera, siendo el agua y el CO<sub>2</sub> los principales componentes atmosféricos que la absorben, llamados por eso gases de efecto invernadero.

En los días nublados disminuye considerablemente la intensidad de la radiación y, por lo tanto, el aporte energético que puede recibir una instalación de energía solar térmica. Aunque la relación entre las variaciones en la nubosidad y la radiación solar es compleja, probablemente este factor es el más importante a la hora de poder calcular la energía que llega a un punto concreto de la superficie terrestre.



*Figura 6.5. Intensidad de la radiación solar*  
Fuente: Romero (2009)

En México, los niveles de radiación son cercanos a 5 kWh/m<sup>2</sup>-día, lo que lo vuelve un país privilegiado para el uso de la energía solar.



*Figura 6.6. Niveles de radiación solar, México.*  
 Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2010

## **CAPÍTULO 7**

### **CONTAMINACIÓN AMBIENTAL ASOCIADA A LA DESALINIZACIÓN**

Las principales preocupaciones ambientales de la actividad de desalinización giran en torno a las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes del aire, el concentrado y sustancias químicas vertidos en el mar, el uso de grandes cantidades de agua de mar para fines de refrigeración y como agua de alimentación.

Las emisiones de las plantas desalinizadoras varían con la fuente de energía empleada. Cuando en la desalinización se utilizan fuentes de energía renovables, como es el caso de la energía solar, la principal preocupación ambiental es el concentrado. Esta preocupación aumenta con el método de disposición utilizado, ya que, dependiendo el cuerpo receptor serán los efectos.

El concentrado, también conocido como salmuera, es un subproducto de los procesos de desalación que contiene principalmente los componentes naturales del agua de mar de entrada, solo que en forma concentrada. Además, según el tipo de proceso empleado, productos químicos utilizados en el pretratamiento del agua de alimentación, como biosidas, metales pesados, antiescalantes, coagulantes, agentes antiespumantes, productos químicos de limpieza, etc. pueden aumentar la salinidad y la temperatura en el lugar de descarga afectando negativamente a los ecosistemas locales (Lattemann, 2008).

A lo largo de la historia se han empleado diversos sitios como receptores de estas salmueras, encontrando afectación en los organismos ya que no están adaptados a tan altas concentraciones de sales.

La disposición de salmueras ha estado asociada con la minimización de los impactos ambientales, pero no es suficiente, el problema debe ser afrontado en su totalidad, de lo contrario, un mal manejo de este tipo de residuos volvería el proceso de desalinización inadecuado desde el punto de vista ambiental.

Un elemento central de todos los estudios ambientales es la comparación de las alternativas posibles, tales como los sitios de proyectos o tecnologías alternativas con el fin de identificar la opción con el menor impacto ambiental (Cipollina, et al., 2009).

Las primeras desalinizadoras se enfatizaron en la producción de agua con poca consideración por el impacto ambiental. En las regiones costeras, la eliminación de agua salada puede llevarse a cabo mediante la descarga en el cuerpo de agua de mar, sin embargo, las regiones continentales no tienen esa opción.

La eliminación inadecuada tiene el potencial de contaminar las aguas subterráneas y pueden tener un profundo impacto en las propiedades del subsuelo si se descarga mediante la aplicación al suelo. El alto contenido de sal en el efluente con niveles elevados de sodio, cloruro y boro pueden reducir la productividad de las plantas y del suelo y aumentar el riesgo de salinización de los suelos. Aunque el sodio no reduce el consumo de agua por las plantas, cambia la estructura del suelo y deteriora la infiltración de agua, afectando su crecimiento. Además reduce la lixiviación de sales de la zona de la raíz debido a la mala permeabilidad. Los metales pesados y compuestos inorgánicos se acumulan en el suelo y en las fuentes de aguas subterráneas que pueden causar problemas de salud a largo plazo (Mohamed, 2005).

Las alternativas de eliminación de concentrado más utilizados son (OMS, 2007):

- Descarga en aguas superficiales;
- Descarga en drenaje sanitario;
- Inyección en pozos profundos;
- Estanques de evaporación;
- Riego por aspersión;
- Cero descarga de líquidos.

Además de los métodos mencionados, dos tendencias adicionales en la gestión de concentrado están ganando aceptación en todo el mundo:

- Gestión regional del concentrado

- Uso beneficioso del concentrado.

Una breve descripción de cada uno de los métodos de eliminación de concentrado se resume a continuación.

### **7.1 Descarga en aguas superficiales**

Este método de tratamiento consiste en la descarga del concentrado en una masa de agua superficial, es decir el cercano océano o el mar, el río, estuario, bahía o lago. Más del 90% de las grandes plantas desalinizadoras en funcionamiento disponen de sus concentrados a través de emisario submarino especialmente diseñado y construido para ese fin (OMS, 2007).

En primera instancia el ambiente acuático se ve afectado por los aditivos presentes en las salmueras o los productos de conversión, además por los productos de corrosión (Hiipner, et al., 1996).

Los desafíos clave relacionados con la selección de la ubicación más adecuada para la descarga del emisario marino de la planta de desalinización son: encontrar un área desprovista de especies en peligro, la identificación de un lugar con fuertes corrientes oceánicas que permita la disipación rápida y eficaz de la descarga de concentrado, evitando zonas con tráfico intenso, que podría dañar el emisario submarino y cambiar los patrones de mezcla, y encontrar un lugar de descarga en aguas relativamente poco profundas que al mismo tiempo este cerca de la costa con el fin de reducir al mínimo los gastos de construcción del emisario. Cuestiones ambientales clave y consideraciones relacionadas con la eliminación de concentrado a las aguas superficiales son:

- Aumento de la salinidad más allá de los límites de tolerancia de la especie en la zona de la descarga;
- La concentración de metales e iones radiactivos a niveles dañinos;
- La concentración de nutrientes;

- La compatibilidad entre la composición del concentrado de planta de desalinización y aguas receptoras (toxicidad impulsada por desequilibrio de iones);
- La temperatura elevada de los procesos de desalación térmica;
- Alteración de la flora y la fauna del fondo marino durante la instalación del emisario submarino.

Las cuestiones clave relacionadas con la viabilidad de la eliminación de la planta desalinizadora de agua de mar se concentra hasta el océano bajo cualquiera de los métodos de descarga descritas anteriormente, incluyendo: la evaluación de la dispersión de descarga, el establecimiento del umbral de salinidad tolerado por los organismos marinos para las condiciones específicas del lugar de descarga y configuración del emisario, la evaluación del potencial de toxicidad del efluente total de la descarga, y la evaluación de si la calidad del agua de descarga cumple los estándares de calidad de agua aplicables hasta el punto de descarga de concentrado.

## **7.2 Descarga en drenaje sanitario**

Este método de descarga de concentrado, sólo es adecuado para la eliminación de concentrado desde plantas de aguas salobres muy pequeñas. La descarga de concentrado a la alcantarilla sanitaria está regulada por las disposiciones aplicables a las descargas industriales y los reglamentos aplicables de descarga que se encargan de la gestión del sistema de alcantarillado sanitario.

La viabilidad de este método de tratamiento está limitada por la capacidad hidráulica del sistema de recolección de aguas residuales y de la capacidad de tratamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales que recibe la aprobación de la gestión. Típicamente, el proceso de tratamiento biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales se inhibe por la alta salinidad cuando la concentración del influente a la planta excede 3 000 mg/litro de SDT.

La descarga a un alcantarillado sanitario es el más ampliamente utilizado para las plantas de desalinización de agua salobre y rara vez se practica para aplicaciones de desalación de agua de mar.

### **7.3 Inyección en pozos profundos**

Este método de tratamiento consiste en la inyección del concentrado en un acuífero profundo confinado, por debajo de un acuífero de agua dulce utilizando un sistema de pozos de eliminación.

Este conjunto de pozos sirven para confirmar que el concentrado no se propague a los acuíferos adyacentes. Una variación de esta alternativa de eliminación es la inyección de concentrado en los campos de gas para la recuperación de petróleo en yacimiento. El pozo de inyección profunda se utiliza por lo general para la eliminación de concentrado de plantas de agua salobre de todos los tamaños.

### **7.4 Estanques de evaporación**

Este método se basa en la evaporación solar natural del concentrado en estanques de tierra alineados u otras cuencas. Estanques de evaporación son una tecnología de descarga cero. Se necesitan estanques para el almacenamiento del concentrado, mientras que la laguna de evaporación alcanza altos niveles de salinidad necesaria para el funcionamiento normal del estanque. El uso de estanques de evaporación está limitado por los siguientes aspectos y consideraciones:

- La evaporación solar sólo es adecuada para la eliminación de concentrado de las plantas pequeñas en zonas áridas con bajos costos de la tierra.
- Requisitos de la tierra son importantes.
- Exige superficie nivelada;
- Dependencia climática;
- La tasa de evaporación disminuye a medida que los sólidos y los niveles de salinidad en el estanques aumentan;

- El riesgo de fuga.
- Las sales acumuladas en la parte inferior de los estanques deben disponerse adecuadamente.

### **7.5 Riego por aspersión**

Esta tecnología utiliza la disposición concentrados para el riego de cultivos tolerantes a la salinidad o plantas ornamentales. Los problemas y limitaciones clave asociadas con riego por aspersión son:

- Estacionalidad.
- Limitado a las plantas desalinizadoras pequeñas.
- Se requiere de una alternativa de eliminación para momentos en que el riego de cultivos no sea necesario.
- Viabilidad determinada por el clima, la disponibilidad de tierras, la demanda de riego y la tolerancia de las plantas regadas.
- El tipo de cultivos y plantas ornamentales que se puede cultivar en el agua de alta salinidad es muy limitada.
- Puede tener un impacto negativo en los acuíferos de agua subterránea debajo de la superficie de regadío.

El uso de este método puede causar problemas significativos si el concentrado contiene arsénico, nitratos, metales u otros contaminantes regulados.

### **7.6 Cero descarga de líquidos**

Estas tecnologías son aquellas capaces de separar el concentrado en agua altamente purificada y el producto sólido seco adecuado para la eliminación en vertederos o la recuperación de sales útiles, como concentradores, cristalizadores y secadores de salmuera.

Concentradores. Son sistemas de evaporación en los que el vapor producido a partir de la ebullición del concentrado es presurizado por un compresor de vapor.

El vapor comprimido se recircula para más producción de vapor a partir del concentrado. Los concentradores se utilizan normalmente para aplicaciones de reutilización de agua. Por lo general, la tecnología de concentración permite la evaporación de 90 a 98% del concentrado y produce agua fresca. La corriente concentrada puede ser deshidrata completamente y dispuesta en un vertedero de residuos como un sólido. En última instancia, el producto de sal concentrada podría ser designado para aplicaciones comerciales. Típicamente la energía para los concentradores se suministra por el sistema de compresión mecánica de vacío.

Cristalizadores. Son unidades que se utilizan para extraer las sales del concentrado. El concentrado se alimenta al recipiente cristizador y se pasa a través del intercambiador de calor de carcasa y tubo y se calienta por el vapor introducido por el compresor de vacío. El agua de baja salinidad separada del concentrado se recoge en forma de destilado en el extremo del condensador. El concentrado caliente entra en el cristizador en el que se hace girar en un vórtice. La masa mineral cristalina se alimenta a una centrífuga o un filtro prensa para deshidratarla. La torta de mineral eliminada contiene 85% de sólidos.

El coste de la energía para la evaporación y la cristalización concentrado es alta y los costos de los equipos suelen ser varias veces mayor que la inversión de capital necesaria para las otras alternativas de eliminación de concentrado.

Debido al alto coste de capital, mantenimiento y de operaciones, las tecnologías de descarga cero no son prácticas a menos que no haya otras alternativas de manejo de concentrados disponibles.

## **7.7 Gestión regional del concentrado**

Incluye dos enfoques alternativos que se pueden usar por separado o aplicarse conjuntamente en la misma instalación:

- Colección regional y la eliminación centralizada de concentrado al cual se le aplica uno o más de los métodos descritos en las secciones anteriores;

- El uso de concentrado de plantas de desalinización de aguas salobres como las fuentes de agua de la planta desalinizadora de agua de mar.

El segundo enfoque se aprovecha del hecho de que en el concentrado a partir de plantas de agua salobre la salinidad es significativamente más baja que el agua de mar, y cuando se mezcla con el agua del océano alimentado a una planta de desalinización de agua de mar reducirá la salinidad global de la planta. El uso del concentrado de agua salobre como agua de alimentación de una planta desalinizadora de agua de mar es de beneficio mutuo tanto para la planta de desalinización de agua salobre como para la de agua de mar.

### **7.8 Uso beneficioso del concentrado**

El concentrado de plantas de desalinización contiene grandes cantidades de minerales que pueden tener valor comercial cuando se extraen. Los minerales más valiosos son: magnesio, calcio y sodio, cloruros y bromo. Las tecnologías para la recuperación de minerales beneficiosos a partir de concentrados se pueden usar para la gestión de concentrado de ambas plantas de desalinización tanto de agua salobre como de mar. Estas tecnologías tienen el potencial de disminuir el volumen y el coste de transporte del concentrado, algunos de los usos que se le da al concentrado son:

- Solidificación de la sal y la recuperación
- Eliminación en humedales salobres
- Utilización como agua de refrigeración
- Industria de producción de cloro (Melián-Martel, 2011)

La inyección en pozos profundos y el riego por aspersión, presentan como principal problema la alteración de la composición del suelo además de la posible contaminación del agua subterránea. Las lagunas de evaporación requieren poco mantenimiento pero dependen de las condiciones climatológicas del lugar presentando además gran demanda de terreno, esto aunado a que el método

funciona solo como un concentrador requiriendo de la disposición final de las sales.

Un método muy ingenioso es la gestión regional de concentrado que aunque no resuelve el problema presenta una buena propuesta al hacerse cargo entre varias plantas del concentrado.

Entre las formas de manejo destacan las que recuperan valores de las salmueras, ya sea rescatando sus constituyentes, muy especialmente el proceso de producción de cloro o hipoclorito de sodio, o reusando el desecho para absorber y aprovechar la energía del sol en lagunas solares.

## CAPÍTULO 8 METODOLOGÍA

Las pruebas experimentales que cubren la metodología se llevaron a cabo en casetas de desalinización solar tipo invernadero. Estas casetas son idénticas entre sí, construidas con policarbonato, con las características mostradas en la siguiente tabla:

Espesor	4 mm
Densidad	1.20 g cm <sup>-3</sup>
Índice de refracción	1.586 a 20°C
Índice de transmisión lumínica	85%

*Tabla 8.1. Características relevantes del policarbonato*

Fuente: [https://plastics.bayer.com/plastics/emea/en/product/makrolon/product\\_datasheets/Makrolon\\_AG2677\\_ISO/gradeld-1001/datasheethtml.jsp](https://plastics.bayer.com/plastics/emea/en/product/makrolon/product_datasheets/Makrolon_AG2677_ISO/gradeld-1001/datasheethtml.jsp)

Las dimensiones de cada caseta son:

- Largo 2.4 m
- Ancho 2.2 m
- Altura pared vertical 1.5 m
- Altura vértice de techo 2.2 m
- Ángulo de escurrimiento 30°

Las casetas se localizan en el edificio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en la Ciudad de México con latitud 19°38'49", longitud 101°13'43", y altitud 1960 m, en los meses de Agosto a Noviembre del año 2013.

La dirección de incidencia solar es Este-Oeste y la dirección del viento en los meses de experimentación que es principalmente de norte a sur, como se muestra en la tabla 8.2.



Figura 8.1. Casetas de desalinización solar.



Figura 8.2. Ubicación de las casetas.

Mes	Mediana (km/hr)	Máximo (km/hr)	Dirección dominante
Julio	9	22	N y NE
Agosto	9	23	N
Septiembre	10	29	N

Octubre	14	42	N
Noviembre	14	41	N

*Tabla 8.2. Magnitud y dirección del viento en los meses de experimentación*

Fuente: <http://www.astrossp.unam.mx/~resast/clima/climaweb/windvel.html>

Estas casetas cuentan con 4 canaletas para colocar el agua cruda con dimensiones de 1.5 m de largo por 0.25 m de ancho con una profundidad de 0.04 m para contar con un volumen individual de 15 litros y un volumen global de 60 litros por caseta de desalinización.

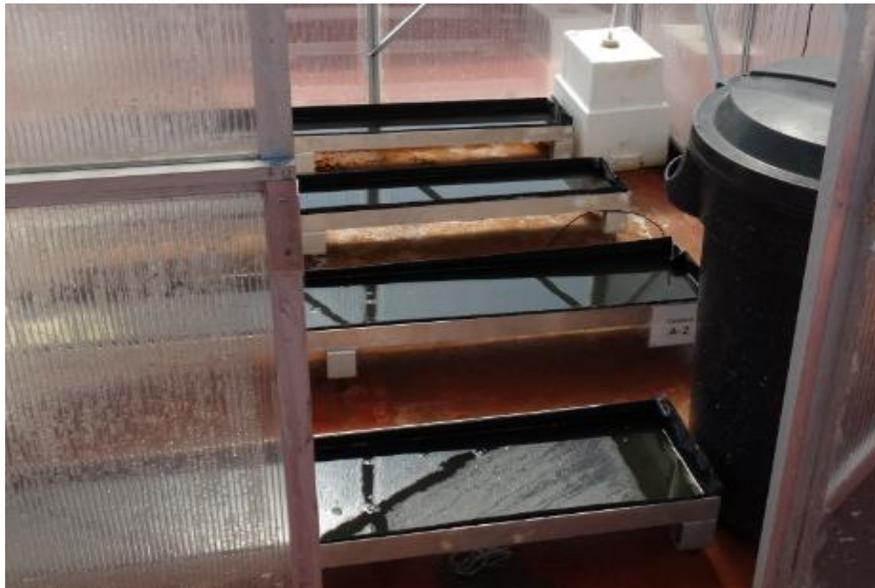


Figura 8.3. Canaletas para el agua cruda.

Las casetas cuentan con sistemas de adquisición de datos para tomar lecturas de temperatura interior, temperatura del agua salina por evaporar, radiación solar y de la humedad relativa del ambiente. Estos adquirentes son colocados en el interior de la caseta.

Estos sistemas de adquisición de datos son:

- Onset HOBO Micro Station Data Logger, H21-002 y Silicon Pyranometer Smart Sensor que registró la radiación solar.
- Onset HOBO Temperature/RH/Light Data Logger que registró las condiciones ambientales como son temperatura de cubierta y del agua, humedad relativa y luminosidad ambiental.

Las características de los sensores se presentan en la Tabla 8.3:

	Intervalo de medición	Exactitud	Resolución	Tasa de muestreo
Radiación solar	0 a 1280 Wm <sup>-2</sup>	± 10 Wm <sup>-2</sup> ó ± 5%	1.25 Wm <sup>-2</sup>	1 seg. a 18 h.
Temperatura	-20° a 70°C	± 0.35°C de 0° a 50°C	0.03°C a 25°C	1 seg. a 18 h.
Humedad relativa (RH)	5% a 95% RH	±2.5% de 10% a 90% RH	0.03% RH	1 seg. a 18 h.
Intensidad luminosa	1 a 45,000 lux			1 seg. a 18 h.

*Tabla 8.3. Características de los sensores*

Fuente: <http://www.au.poznan.pl/wogr/hobo/pdf/rad.pdf> y <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u12-012>

Al iniciar el experimento, se vertió el agua de mar sintética en cada canaleta y se colocó el material poroso correspondiente al experimento, el equipo de medición y los matraces de recolección de destilado y la caseta era sellada para finalizar cada corrida a las 24 hrs.

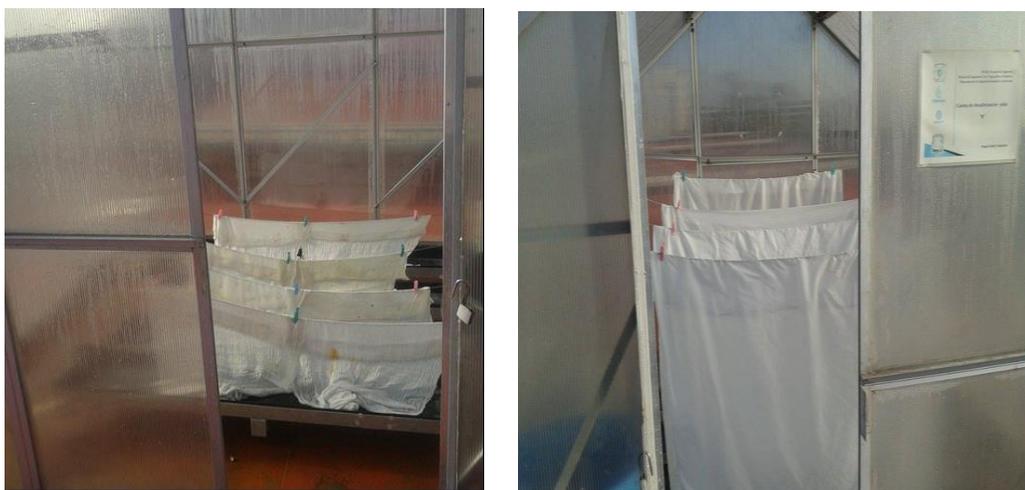


Figura 8.4. Ubicación del material poroso en las canaletas.

En este sistema el agua evapora directamente cuando la capa superficial absorbe la radiación solar, al mismo tiempo que es absorbida por las telas y después evaporada, siendo finalmente condensada gracias al intercambio de calor del vapor de agua con la superficie interna del techo del destilador. El agua que condensa se recolecta en los matraces tal como muestra la siguiente figura.



Figura 8.5. Sistema de recolección de destilado.

## 8.2 Alcances y limitaciones

1. Se utilizó agua preparada en el laboratorio, con base en productos comerciales de cloruro de sodio proveniente del mar, disuelto en agua destilada, con la concentración de agua salina estándar ( $35,000 \text{ mg L}^{-1}$ ).
2. Se empleó sal de mar obtenida en baja california por evaporación.
3. La composición de las telas empleadas se basó en la disponible en el mercado, siendo algodón, lino y viscosa.
4. Los experimentos se realizaron bajo las condiciones meteorológicas de la Ciudad de México, DF.

### 8.3 Procedimiento experimental

Para los experimentos se utilizó agua de las líneas de abastecimiento de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) con las características de agua potable que se presentan en la tabla 8.4 y sal de mar yodada fluorurada procedente de Baja California Sur, México. Se siguieron los siguientes pasos:

- a) Preparación de 60 litros de agua salina a la concentración estándar de 35,000 mg por litro.
- b) Llenado de la bandeja de agua salina con 15 litros y colocación de la superficie de evapotranspiración correspondiente a cada ensayo.
- c) Programación del adquisidor de datos de temperatura del agua salina, del aire en el techo al interior, así como de radiación solar, humedad relativa y luminosidad al interior del destilador, para registro cada 5 minutos durante 24 horas.
- d) Inicio de los ensayos a las 8:00 horas y conclusión a las 8:00 horas del día siguiente.
- e) Recolección y mediciones de volumen, conductividad y sólidos disueltos del agua destilada y agua salina concentrada.
- f) Enjuague de la bandeja de agua salina y del material poroso.
- g) Análisis de calidad conforme la norma de agua potable (NOM-127-SSA1-1994).

Característica	Unidades	Límite permisible	Llave
Aluminio	mg/L	0.20	<0.15
Arsénico	mg/L	0.05	0.0007
Bario	mg/L	0.70	<0.15
Cadmio	mg/L	0.005	<0.005
Cianuros (como CN <sup>-</sup> )	mg/L	0.07	<0.02
Cloro residual libre	mg/L	0.20-1.50	0.80
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	mg/L	250.00	46
Cobre	mg/L	2.00	<0.01
Color	Pt-Co	20.00	0
Cromo total	mg/L	0.05	<0.002
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	mg/L	500.00	1.43
Fenoles o compuestos fenólicos	mg/L	0.30	<0.001
Fierro	mg/L	0.30	<0.015
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	mg/L	1.50	0.442
Hidrocarburos aromáticos			
Benceno	µg/L	10.00	<0.10
Etilbenceno	µg/L	300.00	<0.10
Tolueno	µg/L	700.00	<0.01
Xileno (tres isómeros)	µg/L	500.00	<0.20
Manganeso	mg/L	0.15	<0.01
Mercurio	mg/L	0.001	<0.0005
Nitratos (como N)	mg/L	10.00	9.64
Nitritos (como N)	mg/L	1.00	<0.001
Nitrógeno amoniacal (como N)	mg/L	0.50	<0.06
pH	Unidades de pH	6.50-8.50	6.7
Plaguicidas			
Aldrin y dieldrin	µg/L	0.03	<0.02
Clordano (total de isómeros)	µg/L	0.20	<0.10
DDT (total de isómeros)	µg/L	1.00	<0.50
Gamma -HCH (lindano)	µg/L	2.00	<1.00
Hexaclorobenceno	µg/L	1.00	<0.5
Heptacloro y epóxido de heptacloro	µg/L	0.03	<0.02
Metoxicloro	µg/L	20.00	<10.00
2,4-D	mg/L	30.00	<10.00
Plomo	mg/L	0.01	<0.0005
Sodio	mg/L	200.00	33.87
Sólidos disueltos totales	mg/L	1000.00	327
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> )	mg/L	400.00	17
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L	0.50	<0.01
Trihalometanos totales	mg/L	0.20	<0.10
Turbiedad	UTN	5.00	0.151
Yodo residual libre	mg/L	0.20-0.50	<0.02
Zinc	mg/L	5.00	<0.01
Coliformes fecales	NMP/100mL	Ausencia	<1.1
Coliformes totales	NMP/100mL	Ausencia	<1.1
Cuenta estándar	UFC/100mL	----	1.5x10
Olor	Inodoro	Inodoro	Inodoro
Sabor	Insaboro	Insaboro	Insaboro

*Tabla 8.4. Calidad del agua en instalaciones de la UNAM*

*Fuente: Adaptado de UNAM (2009)*

Cada experimento se desarrolló en ensayos por pares con las mismas condiciones meteorológicas para ambas casetas con variaciones meteorológicas importantes en ensayos diferentes.

### **8.2.1 Experimento 1: Evaluación de la capacidad de producción de agua destilada al cambiar la coloración de la superficie de evapotranspiración.**

Las casetas fueron dotadas de un sistema capilar de tela de poliéster con un diámetro de poro de 0.38 mm, sumando un área de evaporación de 6.3 m<sup>2</sup>, en las que se compararon la coloración blanca y negra, con experimentos por pares. Se seleccionaron estas telas debido a su fácil obtención en el mercado ya que además las ofrecen en las dos coloraciones necesarias evitando problemas de tinción inicial en las telas y final en el concentrado.

Este experimento parte del hecho de que una superficie de color oscuro absorberá más calor radiante que una superficie de color claro, situación que se verá reflejada en el destilado obtenido.



*Figura 8.6. Casetas de destilación solar Experimento 1*

**Diseño experimental:** Análisis de Varianza (ANOVA).

**8.2.2 Experimento 2: Estimación del volumen de destilado producido al cambiar la fibra textil utilizada como superficie de evapotranspiración.**

Se compararon 3 tipos de fibras textiles, elegidas por presentar los niveles de absorción de agua más elevados. Empleando las composiciones encontradas en el mercado eligiendo las que se acercaran más al cien por ciento.

Material	Composición (%)
Algodón	100
Lino	100
Viscosa	91

*Tabla 8.5. Composición telas adquiridas*



*Figura 8.7. Fibras textiles*

Las telas fueron aleatoriamente distribuidas en las dos casetas, dotándolas del sistema capilar como muestra la siguiente tabla.

Caseta	
A	B
Lino	Viscosa
Lino	Algodón
Algodón	Lino
Algodón	Viscosa
Viscosa	Algodón
Viscosa	Lino

*Tabla 8.6. Aleatorización empleada Experimento 3*

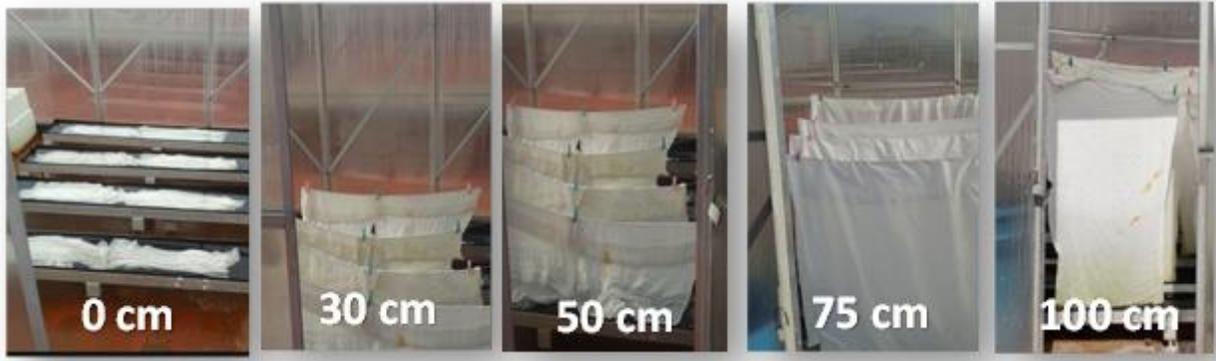
**Diseño experimental:** Diseño en bloques aleatorios.

### **8.2.3 Experimento 3: Evaluación de la capacidad de producción de agua destilada al variar la altura de la superficie de evapotranspiración.**

Para este experimento las dos casetas fueron dotadas de un sistema capilar de tela de algodón de 1.5 m de alto y 1.2 m de ancho, cuyos poros visibles tienen 0.5 mm de diámetro, elevándolas a diferentes alturas del contenedor de agua salada. Las alturas empleadas fueron las correspondientes a los 5 niveles enlistados en la siguiente tabla.

Nivel	Altura (cm)
1	0
2	30
3	50
4	75
5	100

*Tabla 8.7. Niveles empleados experimento 2*



*Figura 8.8. Alturas*

**Diseño experimental:** Análisis de Varianza (ANOVA).

## CAPÍTULO 9

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados, asimismo, la discusión correspondiente de las actividades experimentales que se dispusieron para la validación de la hipótesis de trabajo y los objetivos de la investigación.

#### 9.1 Experimento 1: Evaluación de la capacidad de producción de agua destilada al cambiar la coloración de la superficie de evapotranspiración.

El promedio de producción de agua con tela blanca fue de 1,979 mL, resultando ligeramente mayor que la producción de la tela negra, 1,585 mL, lo que representa un 19.9% de diferencia. Con esto, podemos inferir que si bien la coloración negra absorbe un mayor porcentaje de calor radiante que la blanca, como lo expresa Díaz (2005), no se favorece la producción de destilado, dado que esta mayor absorción de radiación impide que el calor llegue a las canaletas que contienen el agua que es el principal almacenador de calor del sistema.

Se presentan en la tabla 9.1 los resultados promedio. Para los 6 ensayos y el detalle del análisis estadístico se muestran en el Anexo 1.

Caseta	Coloración	
	Blanca	Negra
A	1,345	1,323
B	2,613	1,847
<b>Promedio color</b>	1,979	1,585
<b>Promedio general</b>		<b>1,782</b>

Tabla 9.1. Volúmenes (mL) obtenidos Experimento 1

Aplicando el análisis de varianza (ANOVA) para un intervalo de confianza del 95%, obtenemos los siguientes datos.

<b>Fuentes de variación</b>	<b>GL</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>
Tratamientos	1	155,367	155,367	10.08
Bloques	1	802,517	802,517	52.05
Error	9	138,756	15,417	
Total	11	1,096,641		

*Tabla 9.2. Resultados ANOVA Experimento 1*

Para un intervalo de confianza del 95% se tiene que  $\alpha_{0.05(1, 9)}=5.12$ . Como 10.08 y 52.05 son mayores se acepta la Hipótesis Alternativa.

Evidentemente existe una influencia debida a las casetas, ya que la caseta B produce mayor cantidad de agua que la caseta A, esto, debido a que como se observa en la tabla 8.2 la dirección del viento favorece el enfriamiento de la caseta B con respecto a la A gracias a su distribución. Es decir, el viento choca con la caseta B enfriándola, pero, es desviado y no incide en igual magnitud en la caseta A, lo que se ve reflejado en el menor volumen de condensado producido.

Al analizar los resultados considerando la variación debida a las casetas, la diferencia entre la coloración blanca y negra resultó significativa para la caseta B. Aunado a esto, la tela blanca favorece las condiciones de limpieza y es más fácil de adquirir, por lo que, se seleccionó el color blanco para las telas de los experimentos posteriores.

## **9.2 Experimento 2: Estimación del volumen de destilado producido al cambiar la fibra textil utilizada como superficie de evapotranspiración.**

La mayor producción de agua potable se obtuvo al utilizar la tela de algodón, siguiendo en producción la tela de viscosa y finalmente el lino. Los datos promedio obtenidos para este experimento se enlistan en la tabla 9.3, el detalle se muestra en el Anexo 2.

Caseta	Fibra textil			
	Lino	Viscosa	Algodón	Poliéster
A	1,425	1,770	2,115	1,345
B	2,325	2,425	2,265	2,613
<b>Promedio general</b>				<b>2,035</b>

Tabla 9.3. Volúmenes (mL) obtenidos por tipo de fibra

Los resultados de un análisis ANOVA para el Diseño en Bloques completamente al azar se representa en la tabla siguiente:

Fuentes de variación	GL	SS	MS	F
Tratamientos	2	104,858	52,429	2.87
Bloques	1	484,504	484,504	26.50
Error	8	146,258	18,282	
Total	11	735,621		

Tabla 9.4. Análisis de varianza Experimento 2

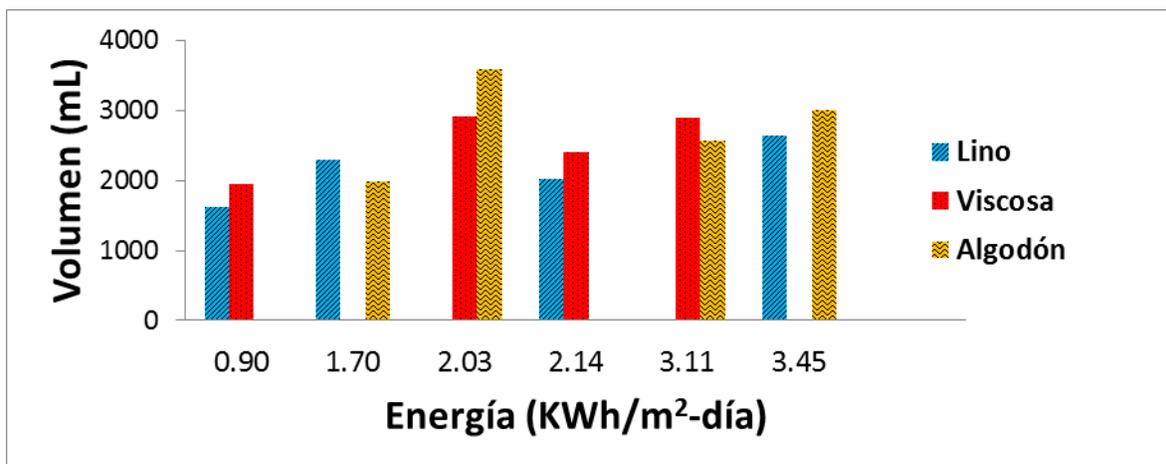
Para un intervalo de confianza del 95% se tiene que  $\alpha_{0.05(2, 8)}=4.46$  y  $\alpha_{0.05(1, 8)}=5.32$ . Como  $2.87 < 4.46$ , se acepta la Hipótesis Nula, lo que significa que las diferencias entre los tipos de fibras no son significativas. Además como  $26.50 > 5.32$ , si existen diferencias significativas entre la caseta A y B.

Se realizó un análisis para verificar la interacción entre las fuentes de variación en el cual se encontró que para un intervalo de confianza del 95% las diferencias no son significativas ya que se tiene que  $\alpha_{0.05(2, 6)}=5.14$  y  $\alpha_{0.05(1, 6)}=5.99$ .

Fuentes de variación	GL	SS	MS	F
Fibra	1798542	2	899271	0.21
Caseta	1766905	1	1766905	0.41
Interacción	22841969	2	11420985	2.67
Error	25704146	6	4284024	
Total	52111562	11		

Tabla 9.5. Análisis con diseño factorial Experimento 2

Sin embargo, se observa un mayor volumen producido por las telas de algodón, hecho observado en la siguiente figura, donde se ubican las producciones correspondientes a cada tela por ensayo, ordenando los ensayos en forma creciente de energía recibida, lo que permite observar cómo se vieron influenciados los por las condiciones meteorológicas.



*Figura 9.1. Producción de destilado para diferentes fibras textiles*

Cabe mencionar que al ubicar el volumen producido con el valor de energía recibido en orden ascendente se observa que no se obtiene un aumento lineal en la producción, en la figura 9.1 se observa este comportamiento en todas las fibras siendo más notorio en las telas de algodón que al recibir 2.03 KWh/m<sup>2</sup>-día presentan un volumen mayor que al recibir 3.45 KWh/m<sup>2</sup>-día.

Considerando que, en suma, cada tipo de fibra recibió diferentes niveles de energía a lo largo de las repeticiones, el siguiente gráfico muestra el volumen de destilado que produjo cada tela con la energía que recibió en todo el experimento. Si bien la viscosa recibió en suma una mayor cantidad de energía no produjo el mayor volumen.

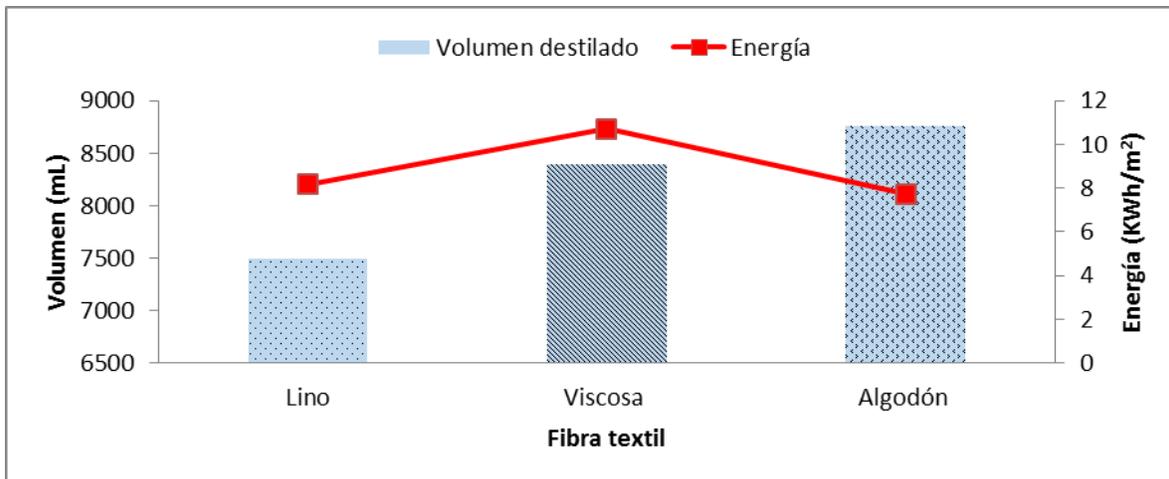


Figura 9.2. Producción de destilado acumulado por fibra textil

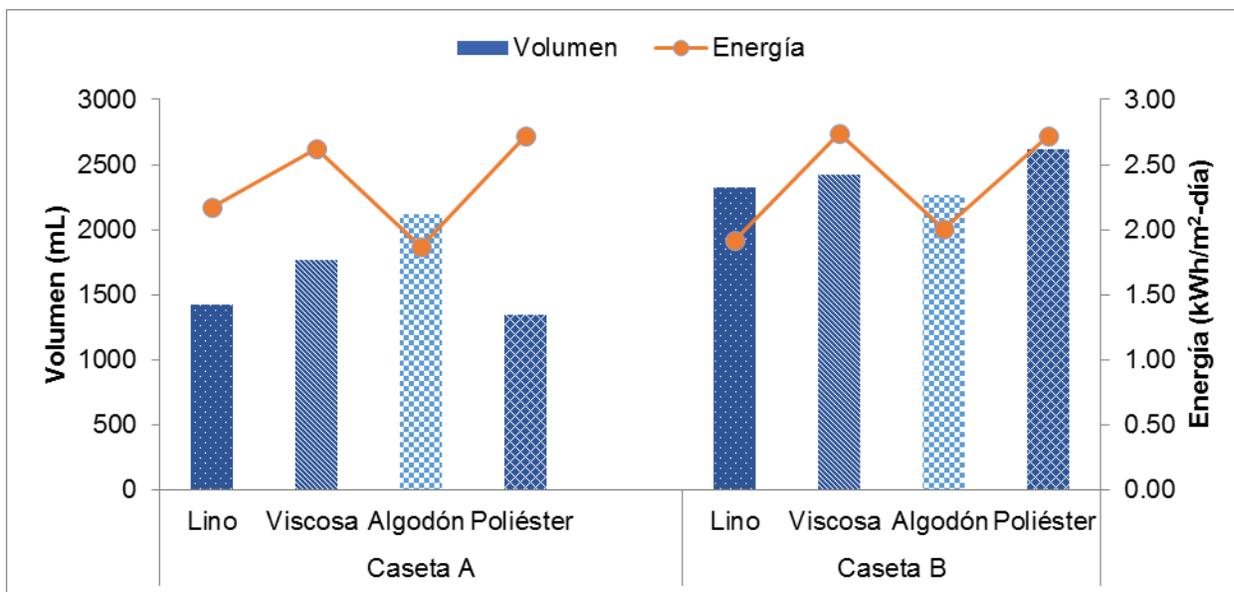


Figura 9.3. Producción de destilado por caseta y fibra textil

La producción acumulada es mayor en viscosa que en lino en un 10.61%. En cuanto al algodón, muestra mayor producción acumulada que el lino en un 14.38% y la viscosa en un 4.22%.

Debido a lo anterior, la facilidad de obtención y a la diferencia de precios entre el algodón y la viscosa, se seleccionó el algodón para el próximo experimento.

### 9.3 Experimento 3: Evaluación de la capacidad de producción de agua destilada al variar la altura de la superficie de evapotranspiración.

La tabla 9.6 presenta los datos obtenidos.

Caseta	Altura (cm)				
	0	30	50	75	100
A	1,410	2,285	1,410	1,860	2,255
B	1,960	3,695	2,210	2,870	2,960
Promedio altura	1,685	2,990	1,810	2,365	2,607.5
<b>Promedio general</b>					<b>2,291.5</b>

Tabla 9.6. Volúmenes obtenidos (mL) Experimento 3

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para el Diseño en Bloques completamente al azar se representan en la tabla siguiente:

Fuentes de variación	GL	SS	MS	F
Tratamientos	4	2,385,690	596,423	37.73
Bloques	1	2,002,563	2,002,563	126.69
Error	14	221,300	15,807	
Total	19	4,609,553		

Tabla 9.7. Resultados ANOVA Experimento 3

Para un intervalo de confianza del 95% se tiene que  $\alpha_{0.05(4, 14)} = 3.11$  y  $\alpha_{0.05(1, 14)} = 4.60$ . Como  $37.73 > 3.11$  y  $126.69 > 4.60$ , se acepta la Hipótesis Alternativa, lo que significa que si existen diferencias significativas entre las alturas comparadas pero además entre las casetas.

Para encontrar las diferencias significativas entre las alturas se realizó además una prueba de intervalos múltiples de Duncan.

Los promedios de los tratamientos se dispusieron en orden ascendente como indica la tabla 9.8.

	Altura (cm)				
	0	50	75	100	30
$\bar{Y}$ (mL)	1,685	1,810	2,365	2,607.5	2,990

Tabla 9.8. Resultados promedio ordenados para la prueba de Duncan

Al comparar las medias se obtiene la siguiente tabla, donde solo resulta significativa la altura de 30 cm con respecto a la de 0 y 50 cm.

Alturas comparadas (cm)		Resultado
50	0	No significativa
75	0	No significativa
100	0	Significativa
30	0	Significativa
75	50	No significativa
100	50	Significativa
30	50	Significativa
100	75	No significativa
30	75	No significativa
30	100	No significativa

Tabla 9.9. Comparación de medias

En la siguiente figura, se presentan los niveles de energía que se recibieron para cada altura y su volumen total destilado a lo largo del experimento.

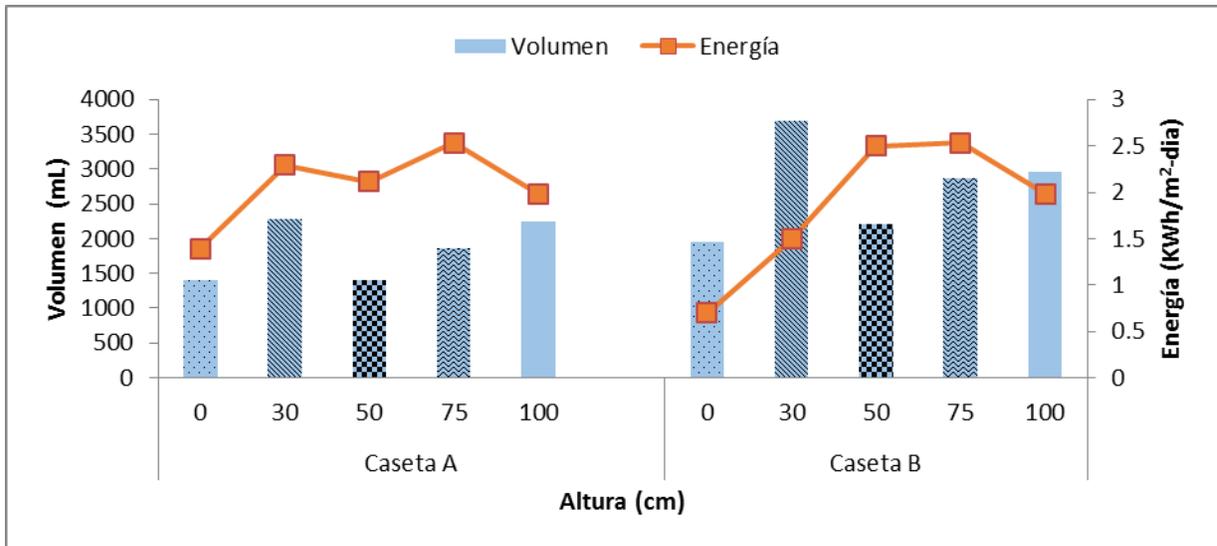


Figura 9.4. Producción de destilado por altura

Las alturas que recibieron una mayor cantidad de energía fueron las de 75 cm y 50 cm, presentando esta última una producción cercana a la que mostró la altura de 0 cm que recibió el menor valor de energía del experimento. Las alturas de 30 y 100 cm recibieron niveles muy similares de energía, sin embargo, la producción acumulada es mayor para los 30 cm en un 12.80%. Esto puede atribuirse a que al elevar las fibras más allá de la altura a la que el agua se eleva por capilaridad se produce un efecto de sombreado sobre la superficie de agua y las mismas telas.

Por lo tanto, al no encontrar diferencias significativas entre los 30, 75 y 100 cm, se elige la menor altura, es decir, 30 cm que además de presentar la mayor producción promedio permite aminorar los costos del sistema.

#### 9.4 Calidad del agua

Durante la evaluación de los experimentos antes descritos se analizó también el contenido de sales en el agua destilada y en la salmuera con base en lo establecido en las normas mexicanas NMX-AA-034-SCFI-2001 y NMX-AA-093-SCFI-2000 para la determinación de sólidos y sales disueltas en aguas, además de la conductividad electrolítica.

Obteniendo con esto la concentración de sales promedio en mg/L enlistadas en la tabla 9.9.

Concentración de sales promedio (mg/L)		
Inicial	Destilado	Salmuera
35,000	168	39,980

*Tabla 9.10. Concentración de sales en corrientes del sistema*

Al comparar estos resultados con los límites establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000), que establece 1000 mg/L, se observa que el destilado se conserva por debajo del límite permisible.

Las salmueras son la principal corriente de descarga, su concentración dependerá del proceso de desalinización empleado. Presentaran mayores concentraciones dependiendo de la eficiencia del proceso de desalinización.

Proceso	Autor	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)
Ósmosis inversa	Voutchkov et al., 2011	33,500	67,000
Destilación solar	Silva-Martinez,	35,000	60,000
Destilación solar	López-Ortega, 2014	35,000	39,980

*Tabla 9.11. Concentración en salmuera de distintos procesos*

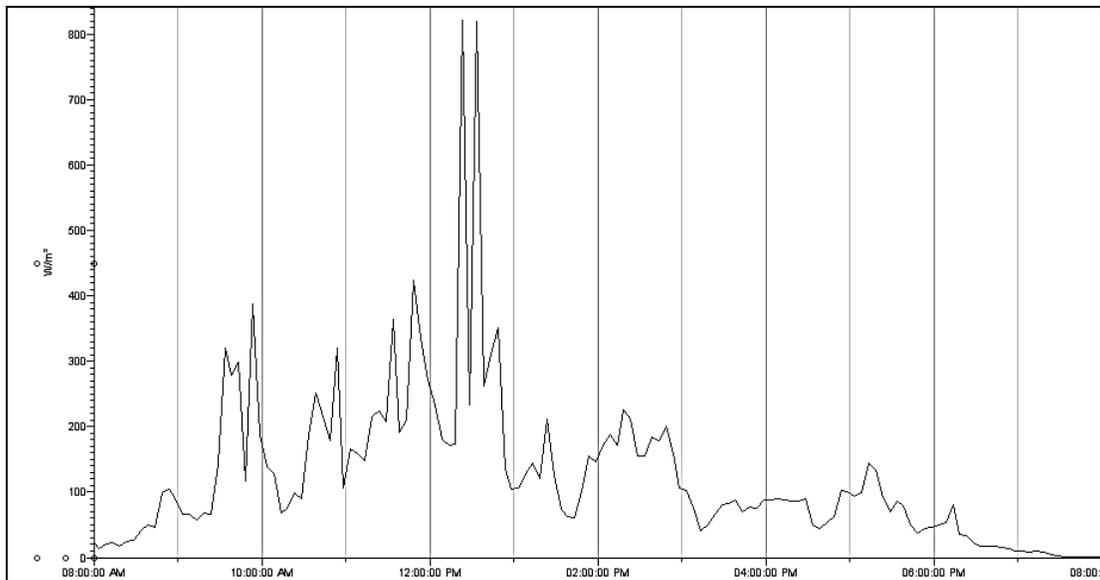
La salmuera producida, aún puede ser destilada ya que presenta concentraciones menores a las señaladas por otros autores (tabla 9.10) y dependiendo del método de disposición seleccionado se puede continuar la evaporación por aproximadamente 5 días hasta alcanzar la condición de la figura 9.7, donde se observa la formación de cristales de sal.



*Figura 9.5. Cristales de sal*

## 9.5 Resultado global

Con los experimentos realizados se obtuvieron tres condiciones que permiten optimizar el destilador, la coloración blanca de la tela de algodón a 30 cm de altura. Para estas características y con las condiciones meteorológicas de la ciudad de México, el mayor volumen obtenido fue de 5,340 mL para el día 12 de Septiembre del 2013, con la radiación que muestra la siguiente figura con 1.02 KWh/m<sup>2</sup>.



*Figura 9.6. Niveles de radiación (W/m<sup>2</sup>) 12 de Septiembre del 2013*

Lo que con el área de exposición de las canaletas da un total de 3,560 mL/m<sup>2</sup> ó 3.56 L/m<sup>2</sup>. Comparando este resultado con el volumen obtenido en la caseta simple para la misma fecha, tenemos que se logra un aumento del 80 %. Lográndose una mejora producción de 3.56 L/m<sup>2</sup> contra 0.71 L/m<sup>2</sup> en la caseta simple.

La cantidad diaria de agua potable que necesitan los humanos varía entre 2 y 8 L por persona y el requisito típico para el agua destilada es 5 L por persona por día. La OMS considera que se requieren 7.5 L por persona diarios para cubrir las

necesidades básicas de bebida y preparación de comida (OMS, 2003). Entonces, se necesitan aproximadamente tres casetas como las empleadas en este trabajo para servir a dos persona.

### 9.5.1 Costos

La instalación de una caseta con las características de las empleadas en este trabajo en pesos mexicanos para el año 2013 con precios de menudeo implica una inversión de \$ 7, 630. Por lo que para servir a una familia promedio de 4 personas, se requeriría la instalación de 6 casetas.

Material	Dimensiones	Precio unitario (\$)	Unidades empleadas	Total (\$)
Lamina de policarbonato	1.2 x 1.8 m	315	20	6,300
Aluminio	1 m	26	50	1,300
Tela de algodón	1.4 x 1 m	20	1.5	30
<b>Costo total</b>				<b>7,630</b>

*Tabla 9.12. Costo Destilador solar tipo invernadero*

Si consideramos un periodo de vida útil de 5 años con esta producción de agua, se obtienen un total de 9, 745.5 L, dando un costo por litro de 0.783 \$/L.

Se considera que una planta de destiladores solares tiene la productividad y la eficiencia térmica más baja entre otros métodos. Sin embargo, esto se mejora mediante diversos métodos pasivos y activos. La siguiente tabla compara destiladores solares de distintos tipos, su producción media anual y el costo resultante por cada litro de agua en un metro cuadrado.

Tipo de destilador	Producción media anual (L/m <sup>2</sup> )	Costo por litro (\$/L/m <sup>2</sup> )
Pirámide	1533	0.434
Seguimiento solar	250	3.220
Pendiente individual	1511	0.490
Semiesférico transportable	1026	2.520
Vertedero	1001	0.756
Evapotranspiración (este trabajo)	1299	1.170

*Tabla 9.13. Costo por litro de agua en diferentes destiladores*

Fuente: Modificado de Kabeel, 2011

En la tabla anterior se puede observar que en costo por litro de agua el sistema con evapotranspiración es inferior al reportado para los destiladores con seguimiento solar y el semiesférico transportable, pero mayor que el de pirámide, pendiente individual y vertedero.

## CAPÍTULO 10

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 10.1 Conclusiones

Con este trabajo se lograron evaluar algunos parámetros que intervienen en el funcionamiento de un destilador solar tipo invernadero asistido con telas de evapotranspiración, permitiendo incrementar la producción de agua potable a partir de agua de mar, logrando elevar la producción en un 80%, obteniendo 3.56 L/m<sup>2</sup> contra 0.71 L/m<sup>2</sup> en la caseta simple.

En el análisis estadístico de los datos se encontraron diferencias significativas en las casetas empleadas debido a que los experimentos son altamente dependientes de las condiciones meteorológicas tales como la radiación, temperatura ambiental, entre otros, condiciones que no son manipulables y varían altamente en cada ensayo.

En el primer experimento se eligió el color blanco ya que la diferencia entre esta con la coloración negra resultó significativa, además de propiciar las condiciones de higiene en el sistema.

Las telas de algodón mostraron mejores resultados al compararlos con el lino y la viscosa. Si bien, no se encontró una gran diferencia entre el algodón y la viscosa, se seleccionó el algodón por ser más económico y de fácil adquisición.

La comparación de las alturas no resultó en un incremento lineal en la producción, encontrando un máximo a los 30 cm. Debido al efecto de sombreado con alturas mayores.

La concentración de sales en el destilado se conserva bajo el límite permisible para sólidos disueltos en agua potable. Las salmueras presentan valores por

debajo de los encontrados en la literatura por lo que puede continuar su evaporación.

Contando con telas blancas de algodón a 30 cm de la superficie del agua en el sistema, se obtiene la producción máxima, que, al ser evaluada con los costos del destilador, compite con el costo por litro que presentan otros destiladores solares publicados.

## **10.2 Recomendaciones**

Para los fines de este trabajo se recomienda:

- Probar el destilador optimizado en las regiones para las cuales se planteó su utilización, regiones que además de contar con agua de mar real, cuentan con niveles de radiación más altos que la Ciudad de México lo que incrementaría razonablemente la producción de destilado.
- Realizar modificaciones en las dimensiones de las casetas de destilación con el fin de encontrar la relación que permita mejorar la relación producción-costos.
- Modificar la distribución interna de las canaletas del agua para facilitar el acceso de los usuarios sin alterar la producción de destilado.
- Establecer el mejor método de disposición de salmueras para que el proyecto sea sustentable.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, Richard G.; Pereira, Luis S.; Raes, Dirk; Smith, Martin (2006) "Evapotranspiración del cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos" Estudio FAO 56, Riego y Drenaje Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia, 323

American Chemical Society (2007). "Química", Reverté, S.A., España, pág. 227. ISBN: 978-84-291-7001-6

Billmeyer, Fred (1975) "Ciencia de los polímeros" Reverté new york

Cipollina, Andrea; Micale, Giorgio; Rizzuti, Lucio; (2009) "Seawater desalination, conventional and renewable energy processes", Ed Springer Heidelberg Dordrecht London New York.

CONAGUA (2011 a), CAPÍTULO 2: Situación de los recursos hídricos, Estadísticas del agua en México (2011)

CONAGUA (2011 b), CAPÍTULO 8: Agua en el mundo, Estadísticas del agua en México (2011)

Delyannis, E. (2003) Historic background of desalination and renewable energies Solar Energy 75 (2003) 357–366

Díaz, Victoriano S., (2005). "Acondicionamiento térmico de edificios", Primera edición, Nobuko, Buenos Aires, pág. 63. ISBN: 987-1135-94-7

Ettouney, H.; Rizzuti, Lucio (2006) "Solar Desalination: A Challenge for Sustainable Fresh Water in the 21st Century", in: Solar Desalination for the 21st Century, Springer, 2006, pp. 1–18.

Fidel, E.; Lockuán L. (2013) "La industria textil y su control de calidad"

García, Burbano; Gracia, Carlos; (2003). "Física general", 32ª edición, Tébar, pág. 631-632. ISBN: 978-84-95447-82-1

García, E.; Gutiérrez, R.; Adrados, C.; Blaise-Ombrecht (2007) "Performance analysis of a solar still integrated in a greenhouse", *Desalination* (203): 435–443.

Gleick P H, 1996, Basic water requirements for human activities: meeting basic needs, *Water International*, 21: 83-92.

Guha Mazumder, D.N. (2003) Chronic arsenic toxicity: clinical features, epidemiology, and treatment: experience in West Bengal, *J. Environ. Sci. Health, Part A–Toxic/Haz. Sub. Environ. Eng.*, 38:141–163.

Henry, Glynn; Heinke, Gary (1999). “Ingeniería ambiental”, Segunda edición, Prentice Hall, México, pág. 221- 226. ISBN: 970-17-0266-2

Hewitt, Paul G. (2004). “Física conceptual”, Novena edición, Pearson, México, pág. 498-499. ISBN: 970-26-0447-8

Hiipner T; Windelbergs J (1996), Elements of environmental impact studies on coastal desalination plants *Desalination* 108 11-18

Jalalia A.A.; Mohammadib, F.; Ashrafizadeh, S.N. (2009). Effects of process conditions on cell voltage, current efficiency and voltage balance of a chlor-alkali membrane cell *Desalination* 237 126–139

Jijakli K., et al., (2012). How green solar desalination really is? Environmental assessment using life-cycle analysis (LCA) approach. *Journal of Desalination*. 287(15):123-131.

Jiménez Cisneros, Blanca Elena (2001) “La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada”. Mexico: Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C., Instituto de Ingenieria de la UNAM y FEMISCA, pp 54.

Kabeel A.E., El-Agouz S.A., (2011) Review of researches and developments on solar stills, *Desalination* 276 1–12.

Kalogirou, S. (2005) Seawater desalination using renewable energy sources, *Progress in Energy and Combustion Science* 31, 242–281

Kalogirou, S. (2009). *Solar energy engineering: Processes and systems*. Burlington, MA: Elsevier/Academic Press

Lattemann, Sabine; Höpner, Thomas (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination* 220, 1–15.

Malik, M; Tiwari, G; Kumar, A; Sodha, M; (1982) *Solar Distillation*, Pergamon Press, Oxford,.

Melián-Martel, N; Sadhwani, J.J.; Ovidio Pérez Báez, S. (2011). Saline waste disposal reuse for desalination plants for the chlor-alkali industry The particular case of pozo izquierdo SWRO desalination plant. *Desalination* 281, 35–41.

Mohamed, A.M.O.; Maraqa, M.;, Al Handhaly, J. (2005). Impact of land disposal of reject brine from desalination plants on soil and groundwater. *Desalination* 182, 411–433.

Morimoto T., Suzuki K., Matsubara T., Yoshida N. (2000). Oxygen reduction electrode in brine electrolysis. *Electrochimica Acta* 45 4257–4262.

Núñez Solís, Jorge (1985) *Fundamentos de Edafología*, Universidad Estatal a Distancia San Jose, Costa Rica. 69

OMS (2003), *Domestic Water Quantity, Service Level and Health*, World Health Organization (WHO), Geneva.

OMS (1993), *Guidelines for Drinking Water Quality*, World Health Organization (WHO), Geneva

OMS (2007) *Desalination for Safe Water Supply, Guidance for the Health and Environmental Aspects Applicable to Desalination*, World Health Organization (WHO), Geneva, 55-63.

OMS (2011) *Safe Drinking-water from Desalination*, World Health Organization (WHO), Geneva.

Phadatarea, Vermab, (2009) Effect of cover materials on heat and mass transfer coefficients in a plastic solar still, *Desalination and Water Treatment* 2: 248–253.

Pineda, L.; Jara, M. (2010) “*Prospectiva y vigilancia tecnológica en la cadena Fibra-Textil-Confecciones*” Editorial Universidad del Rosario ISBN:978-958-738-080-4

Rodríguez, José; Virgós, José (1998). “*Fundamentos de óptica ondulatoria*”, Universidad de Oviedo, pág. 37-42. ISBN: 84-8317-117-1

Romero Tous, Marcelo (2009). “*Energía solar térmica*”, Ceac, España, pág. 19. ISBN: 978-84-329-2035-6

Silva Martínez Ana Elisa, (2012) *Mejoramiento de la calidad de aguas salinas y salobres mediante un sistema de evapotranspiración y destilación solar*. Tesis Doctoral. UNAM. Ciudad de México. p. 5-1 – 6-4.

Sphere Project, 2002, Humanitarian charter and minimum standards in disaster response, OXFAM Publishing, Oxford, UK.

Telkes, Maria (1956) Research of Methods for Solar Distillation, *Research and Development Progress Report No. 13*. Unites States, Department of Interior, Office of Saline Water.

Tinu Abraham, Amit Luthra, (2011). Socio-economic & technical asesment of photovoltaic powered membrane desalination processes for India. *Journal of Desalination*. 268 (1-3):238-248.

UNAM Instituto de Ingeniería, (2009). Anexo- Calidad del agua [http://www.agua.unam.mx/assets/pumagua/informes/05\\_calidaddelagua2009.pdf](http://www.agua.unam.mx/assets/pumagua/informes/05_calidaddelagua2009.pdf). Revisado en Mayo 2014

Voutchkov, Nikolay (2011). Overview of seawater concentrate disposal alternatives, *Journal of Desalination* 273, 205–219.

Waugh, J.L.T. (1982) *Encyclopedia of Science and Technology*, McGraw-Hill, New York.

## ANEXOS

**ANEXO 1. Resultados Experimento 1: Evaluación de la capacidad de producción de agua destilada al cambiar la coloración de la superficie de evapotranspiración.**

La siguiente tabla presenta los volúmenes de destilado en mL obtenidos para el experimento 1.

Caseta	Coloración	
	Blanca	Negra
A	955	1,050
	1,375	1,460
	1,705	1,460
B	3,540	2,460
	2,980	1,840
	1,320	1,240
<b>Promedio</b>	1,979	1,585
<b>Promedio general</b>		<b>1,782</b>

*Tabla A.1. Resultados (mL) Experimento 1*

Caseta	Coloración	
	Blanca	Negra
A	1,345	1,323
B	2,613	1,847

*Tabla A.2. Resultados promedio (mL) Experimento 1*

De los valores obtenidos se observa una mayor producción para la coloración blanca. Se analizó esto empleando un análisis de varianza.

$$\frac{(Y..)^2}{ab} = 12,703,284$$

Suma de cuadrados totales

Caseta	Coloración	
	Blanca	Negra

<b>A</b>	1,809,025	1,751,211
<b>B</b>	6,829,511	3,410,177

Tabla A.3. Suma de cuadrados Experimento 1

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{(Y_{..})^2}{ab}$$

$$SS_T = 1,096,641$$

Suma de Cuadrados de Tratamientos:  $SS_A$

Caseta	Coloración	
	Blanca	Negra
$\Sigma Y_i$	3,958	3,170
$(\Sigma Y_i)^2$	15,668,403	10,048,900

Tabla A.4. Suma de cuadrados de tratamientos Experimento 1

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{b} - \frac{(Y_{..})^2}{ab}$$

$$SS_A = 155,367$$

Suma de Cuadrados de Bloques:  $SS_B$

Caseta	$\Sigma y_{.j}$	$(\Sigma y_{.j})^2$
<b>A</b>	2,668	7,120,003
<b>B</b>	4,460	19,891,600

Tabla A.5. Suma de cuadrados de bloques Experimento 1

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j}^2}{a} - \frac{(Y_{..})^2}{ab}$$

$$SS_B = 802,517$$

Suma de Cuadrados del Error:  $SS_E$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B$$

$$SS_E = 138,756$$

Fuentes de variación	GL	SS	MS	F
Tratamientos	1	155,367	155,367	10.08
Bloques	1	802,517	802,517	52.05
Error	9	138,756	15,417	
Total	11	1,096,641		

Tabla A.6. Análisis de varianza Experimento 1

Para un intervalo de confianza del 95% se tiene que  $\alpha_{0.05(1, 9)}=5.12$ . Como 10.08 y 52.05 son mayores se acepta la Hipótesis Alternativa, si existen diferencias significativas entre tratamientos.

**ANEXO 2. Resultados experimento 2: Estimación del volumen de destilado producido al cambiar la fibra textil utilizada como superficie de evapotranspiración.**

La tabla A. 7 presenta los volúmenes de destilado en mL obtenidos para las fibras empleadas en el experimento 2. Los cuales se analizaron empleando un análisis de varianza.

Caseta	Fibra textil		
	Lino	Viscosa	Algodón
A	1,130	1,860	1,680
	1,720	1,680	2,550
B	2,640	1,940	1,970
	2,010	2,910	2,560
<b>Promedio</b>	1,875	2,097	2,190
<b>Promedio general</b>			<b>2,054</b>

*Tabla A. 7. Resultados (mL) Experimento 2*

Caseta	Fibra textil		
	Lino	Viscosa	Algodón
A	1,425	1,770	2,115
B	2,325	2,425	2,265

*Tabla A. 8. Resultados promedio (mL) Experimento 2*

$$\frac{(Y..)^2}{ab} = 25,317,604$$

Suma de cuadrados totales

Caseta	Fibra textil		
	Lino	Viscosa	Algodón
A	2,030,625	3,132,900	4,473,225
B	5,405,625	5,880,625	5,130,225

*Tabla A. 9. Suma de cuadrados Experimento 2*

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{(Y_{..})^2}{ab}$$

$$SS_T = 735,621$$

Suma de Cuadrados de Tratamientos:  $SS_A$

	Fibra textil		
	Lino	Viscosa	Algodón
$\Sigma Y_i$	3,750	4,195	4,380
$(\Sigma Y_i)^2$	14,062,500	17,598,025	19,184,400

Tabla A. 10. Suma de cuadrados de tratamientos Experimento 2

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{b} - \frac{(Y_{..})^2}{ab}$$

$$SS_A = 104,858$$

Suma de Cuadrados de Bloques:  $SS_B$

Caseta	$\Sigma y_{.j}$	$(\Sigma y_{.j})^2$
<b>A</b>	5,310	28,196,100
<b>B</b>	7,015	49,210,225

Tabla A. 11. Suma de cuadrados de bloques Experimento 2

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_j^2}{a} - \frac{(Y_{..})^2}{ab}$$

$$SS_B = 484,504$$

Suma de Cuadrados del Error:  $SS_E$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B = 146,258$$

Fuentes de variación	GL	SS	MS	F
----------------------	----	----	----	---

Tratamientos	2	104,858	52,429	2.87
Bloques	1	484,504	484,504	26.50
Error	8	146,258	18,282	
Total	11	735,621		

Tabla A. 12. Análisis de varianza Experimento 2

Para un intervalo de confianza del 95% se tiene que  $\alpha_{0.05(2, 8)}=4.46$  y  $\alpha_{0.05(1, 8)}=5.32$ . Como  $2.87 < 4.46$ , se acepta la Hipótesis Nula, lo que significa que no existen diferencias entre tratamientos. Además como  $26.50 > 5.32$ , si existen diferencias significativas entre bloques.

**ANEXO 3. Resultados experimento 3: Evaluación de la capacidad de producción de agua destilada al variar la altura de la superficie de evapotranspiración.**

La siguiente tabla presenta los volúmenes de destilado en mL obtenidos para el experimento 3. Los cuales se analizaron empleando un análisis de varianza.

Caseta	Altura (cm)				
	0	30	50	75	100
A	1,060	1,480	1,360	2,430	1,940
	1,760	3,090	1,460	1,290	2,570
B	1,260	2,050	2,300	4,110	3,170
	2,660	5,340	2,120	1,630	2,750
<b>Promedio</b>	1,685	2,990	1,810	2,365	2,607.5
<b>Promedio general</b>					<b>2,291.5</b>

*Tabla A. 13. Resultados (mL) Experimento 3*

Caseta	Altura (cm)				
	0	30	50	75	100
A	1,410	2,285	1,410	1,860	2,255
B	1,960	3,695	2,210	2,870	2,960

*Tabla A. 14. Resultados promedio (mL) Experimento 3*

$$\frac{(Y..)^2}{ab} = 52,509,723$$

Suma de cuadrados totales

Caseta	Altura (cm)				
	0	30	50	75	100
A	1,123,600	2,190,400	1,849,600	5,904,900	3,763,600
B	3,097,600	9,548,100	2,131,600	1,664,100	6,604,900

*Tabla A. 15. Suma de cuadrados Experimento 3*

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{(Y_{..})^2}{ab}$$

$$SS_T = 4,609,553$$

Suma de Cuadrados de Tratamientos:  $SS_A$

	Altura (cm)				
	0	30	50	75	100
$\Sigma Y_i$	3,370	5,980	3,620	4,730	5,215
$(\Sigma Y_i)^2$	11,356,900	35,760,400	13,104,400	22,372,900	27,196,225

Tabla A. 16. Suma de cuadrados de tratamientos Experimento 3

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{b} - \frac{(Y_{..})^2}{ab}$$

$$SS_A = 2,385,690$$

Suma de Cuadrados de Bloques:  $SS_B$

Caseta	$\Sigma y_{.j}$	$(\Sigma y_{.j})^2$
<b>A</b>	9,220	85,008,400
<b>B</b>	13,695	187,553,025

Tabla A. 17. Suma de cuadrados de bloques Experimento 3

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j}^2}{a} - \frac{(Y_{..})^2}{ab}$$

$$SS_B = 2,002,563$$

Suma de Cuadrados del Error:  $SS_E$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B = 221,300$$

Los resultados de un ANOVA para el Diseño en Bloques completamente al azar se representan en la tabla siguiente:

Fuentes de variación	GL	SS	MS	F
Tratamientos	4	2,385,690	596,423	37.73
Bloques	1	2,002,563	2,002,563	126.69
Error	14	221,300	15,807	
Total	19	4,609,553		

Tabla A. 18. Análisis de varianza Experimento 3

Para un intervalo de confianza del 95% se tiene que  $\alpha_{0.05(4, 14)} = 3.11$  y  $\alpha_{0.05(1, 14)} = 4.60$ . Como  $37.73 > 3.11$  y  $126.69 > 4.60$ , se acepta la Hipótesis Alternativa, lo que significa que si existen diferencias significativas entre los tratamientos y además entre bloques.

Para este experimento se realizó además una prueba de intervalos múltiples de Duncan para encontrar las diferencias significativas entre tratamientos. Los promedios de los tratamientos se dispusieron en orden ascendente y se determinó el error estándar de cada promedio.

	Altura (cm)				
	0	50	75	100	30
$\bar{Y}$	1,685	1,810	2,365	2,607.5	2,990

Tabla A. 19. Resultados promedio por altura (mL)

Fuentes de variación	GL	SS	MS	F
Tratamientos	4	5,964,225	1,491,056	10.06
Error	15	2,223,863	148,258	
Total	19	4,609,553		

Tabla A. 20. Análisis de varianza Duncan Experimento 3

$$D_{\bar{y}_i} = q_{\alpha(p,df)} \sqrt{\frac{MS_E}{n}}$$

	$q_{\alpha(p,df)}$	$D_{\bar{y}_i}$
q $\alpha.05(2,5)$	3.635	700
q $\alpha.05(3,5)$	3.749	722
q $\alpha.05(4,5)$	3.796	731
q $\alpha.05(5,5)$	3.814	734

Tabla A. 21. Error estándar

Al comparar las medias se obtiene la siguiente tabla.

Alturas comparadas (cm)		Diferencia vs. $D_{\bar{y}_i}$			Resultado
50	0	125	<	700	No significativa
75	0	680	<	722	No significativa
100	0	923	>	731	Significativa
30	0	1,305	>	734	Significativa
75	50	555	<	700	No significativa
100	50	798	>	722	Significativa
30	50	1,180	>	731	Significativa
100	75	243	<	700	No significativa
30	75	625	<	722	No significativa
30	100	383	<	700	No significativa

Tabla A. 22. Comparación de medias