



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

**MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE AGUAS
SALINAS Y SALOBRES MEDIANTE UN SISTEMA DE
EVAPOTRANSPIRACIÓN Y DESTILACIÓN SOLAR.**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL – AGUA

P R E S E N T A

ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ

TUTOR

DR. PEDRO MARTÍNEZ PEREDA

2012



INTEGRANTES DEL JURADO

Presidente	DR. FERNÁNDEZ ZAYAS JOSÉ LUIS
Secretario	DR. GARCÍA VALLADARES OCTAVIO
Vocal	DR. MARTÍNEZ PEREDA PEDRO
1 ^{er} . Suplente	DRA. JIMÉNEZ CISNEROS BLANCA ELENA
2 ^{do} . Suplente	DRA. MIJAYLOVA NACHEVA PETIA

Lugar donde se realizó la tesis:

Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México



TUTOR DE TESIS

DR. PEDRO MARTÍNEZ PEREDA

AGRADECIMIENTOS

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, a través de su FACULTAD DE INGENIERÍA, por ser mi *Alma Mater*, por darme la oportunidad de realizar estudios de posgrado y por admitirme en su selecta fila de profesores. Además, por favorecer que desarrollara en sus instalaciones, la investigación que dio como fruto esta tesis doctoral.

Al CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, por haber apoyado y creído en el grupo de investigación de Desalinización de Agua, por haber financiado sus proyectos de investigación y por difundir los resultados obtenidos.

A la COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, por su interés en el tema de investigación sobre la desalinización como parte de las nuevas alternativas para suministro de agua en zonas áridas y semiáridas de México y el soporte económico para el desarrollo de la línea de investigación de la cual forma parte esta tesis.

Le dedico esta tesis:

A Eduardo,

El verdadero artífice, el Ángel que me ha conducido durante 30 años hasta este momento. Muchas gracias por tanto amor.

A nuestros hijos Guillermo Roberto y Rosario de los Ángeles,

Que han sido mi alegría, orgullo y motivación, esperando haberles dado, con mi corazón, todo lo que requieren.

A la memoria de mi padre el Ing. Guillermo Félix Silva García,

Quien en los breves 15 años que convivimos, sembró con su ejemplo la admiración y el respeto por la Ingeniería en México.

Sinceramente agradezco,

Al Dr. Pedro Martínez Pereda,

Quien con dedicación y su gran pasión por la Ingeniería Ambiental, me ha dirigido desde mis comienzos en la gran aventura por el cuidado del ambiente.

A la Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros,

Quien me exigió siempre la mayor calidad, al tiempo que me brindó su apoyo y su invaluable amistad.

Al Dr. José Luis Fernández Zayas,

Quien con una enorme generosidad, se convirtió en una fuente abierta de conocimiento tanto en los aspectos específicos de la energía solar, como en los caminos para lograr un doctorado.

A la Dra. Petia Mijaylova Nacheva,

Quien con toda gentileza siempre colabora con gran objetividad y decisión.

A la Dra. Rosario Iturbe Argüelles

Por haber sido la mejor amiga y haberme brindado su confianza y generoso apoyo.

Al M:C: Vicente Fuentes Gea,

Por haberme abierto la puerta al Posgrado de Ambiental y haberse comportado como un gran amigo.

Sinceramente agradezco,

A mi madre, la Sra. Ángela Martínez Vda. De Silva,

La mujer extraordinaria, un verdadero ángel, quien se convirtió en mi modelo de dama a seguir.

A mis suegros Roberto y Rosario:

Que me abrieron su hogar con respeto y cariño, tanto nos ayudaron y me dieron el mayor regalo, un maravilloso esposo.

A mis hermanos y sobrinos:

Marilú, Gela, Billy, Alberto y Connie, sus hijos y nietos, que tanto hemos compartido, especialmente a Alberto que ha dedicado su vida a apoyarnos a todos.

A mis cuñados y sobrinos,

Porque con amor y paciencia me recibieron en una nueva familia. Muy especialmente a Susy, Miguel y Fermín y a Vicky y Luis Guillermo, que colaboraron en la construcción de este momento.

Al personal de la Facultad:

Especialmente a Livia Sánchez, Miguel Chávez, Ma. Antonieta, Don Rafael, Almita, Mary Chuy, Briscia, José Manuel, Consuelito, Rosy y todos, todos que me han ayudado con bondad y han sido parte de mi familia.

RESUMEN

Entre los principales sistemas de desalinización aplicados a gran escala, encontramos la ósmosis inversa y la destilación térmica, donde la producción de agua potable está limitada por el consumo de energía y en ello se concentran los mayores esfuerzos en la carrera tecnológica. En pequeña escala encontramos la destilación solar, donde el consumo de energía tiene su base en la energía solar y su limitación a gran escala se encuentra asociada a las grandes superficies territoriales requeridas para suministro de agua de una población.

La idea central de esta propuesta combina los elementos establecidos en la destilación solar y en la evapotranspiración de las plantas, que es evaporación con energía solar con un sistema natural, pero modificado, llevado a cabo con materiales porosos como son las telas de algodón, evitando así la problemática del crecimiento vegetal en condiciones de alta salinidad o de toxicidad.

Este sistema emulador de la evapotranspiración tiene como propósito utilizar fuerzas de capilaridad, cohesión y adhesión para formar delgadas láminas de agua y la exposición a un dispositivo de evaporación con base en la energía solar. Así, se aumenta el área superficial de evaporación (A_{se}) del destilador solar sumando el área de las telas, logrando la producción de mayor cantidad de agua en la misma superficie de terreno (St).

Se desarrolló un número adimensional para calcular la producción de agua obtenida en un destilador solar, utilizando el análisis dimensional para agrupar las variables implicadas en la destilación solar con base en la evapotranspiración, como son el área superficial de evaporación y la concentración de agua en la disolución y formar un parámetro adimensional que permita expresar la relación funcional de dichas variables que se denominó N_{VS} : *Número Vega-Silva*. El modelo experimental se probó, encontrando que es posible incrementar el área de evaporación utilizando superficies porosas en la misma superficie de terreno y lograr incrementar la producción de agua destilada 2.5 veces cuando el *Índice de Área Superficial de Evapotranspiración/Superficie de terreno* (A_{se}/St) es de 4:1 m^2 de área de evapotranspiración sumando el área de las telas/ m^2 superficie del recipiente de agua salina

A nivel piloto, consistente en casetas de desalinización tipo invernadero se pudo comprobar que sí existen diferencias significativas con los diferentes tratamientos, es decir, con las diferentes áreas de evapotranspiración. Sin embargo, no resulta en un incremento lineal y positivo como se planteó en la hipótesis del trabajo. Existe un incremento sostenido hasta que el *Índice A_{se}/St* tuvo valores de 4:1, pero con el de 7.5:1 comienza a reducirse la producción de agua debido al efecto de sombreado y la disminución de temperatura en las canaletas de evaporación sombreadas, no así las asoleadas.

Con este sistema, se lograría contar con un sistema de producción de agua potable aplicable a zonas rurales áridas de México, con fuentes de agua de abastecimiento a la población que no se aprovechen actualmente por sus altos contenidos de sales solubles, incluyendo aguas salina, salobres y contaminadas por metales y metaloides (como arsénico, cadmio o cromo).

ABSTRACT

Actually, the main desalination systems are the Reverse Osmosis and the Thermal Distillation, many large plants have been built account about 90% of the entire desalination market, but the drinking water production is restricted by the use of energy and here is where the technology career concentrated all its attention. In a small scale we have the Solar Still, where the consumption of energy comes from sun energy. The restriction on major scales dues to large land surfaces required to provide drinking water for the people inhabitants.

The main idea of this research is to combine the elements stated in Solar Stills and plant evapotranspiration that is a natural system on plants of vaporizing with Solar Energy, but modified, using porous materials such as cotton tissues, avoiding the problems in vegetables growth in high salinity or toxicity conditions.

The purpose of this system of evapotranspiration is to use forces of capillarity, cohesion and adherence to make thin sheets of water and exposure to an evaporating device based on solar energy. Thus, it increases the evaporation surface area (A_{se}) of the solar still adding the tissues area, achieving the production with more water in the same land surface (St).

A dimensionless number was developed in order to calculate the water production obtained in a solar still, using the dimensional analysis to group the variables involved in the solar still based on the evapotranspiration, such as the evaporating surface area and the water concentration in the dissolution and make an dimensionless parameter that allows expressing a functional relation of these variables called N_{VS} : *Vega-Silva Number*. The experimental model was tested to identify an extended evaporative surface employing several porous media with a constant land surface, which allowed distillate production to increase by a factor of 2.5 when compared with the standard evaporative surface, by making the evaporative surface 4 times as large as the land surface (A_{se}/St index).

At a pilot scale, using a greenhouse like a solar still, it was proved that significant differences do exist with the different treatments, that is, with the different areas of evapotranspiration. However, there is not a lineal and positive increase as stated in the working hypothesis. There is an steady increase until the A_{se}/St index had values of 4:1, from this value until 6:1 A_{se}/St index water production is constant; afterwards with A_{se}/St index of 7.5:1 water production starts to reduce due to the shadow effect and the consequently decrease in temperature in the shadowed evaporation channels, but not in the sunny ones.

With this system, there would be a drinking water production system available for arid rural zones of Mexico, with water resources to supply populations not actually usable on account of its high containments of soluble salts, including seawater, brackish groundwater and also water polluted with metals and metalloids (such as arsenic, cadmium or chromium), with low energetic consumption system, such as the solar still, and that would reduce the land surface that should be used in the water production, which is the limiting element in this kind of systems.

INDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1-1
1.1 <i>Justificación: La demanda de agua.</i>	1-2
1.2 <i>Hipótesis</i>	1-7
1.3 <i>Objetivo</i>	1-8
1.4 <i>Alcances y Limitaciones</i>	1-8
1.5 <i>Estructura del Trabajo</i>	1-9
2. CONCEPTOS GENERALES DE DESALINIZACIÓN	2-1
2.1 <i>Características de aguas salinas y salobres</i>	2-1
2.2 <i>Historia de la desalinización</i>	2-3
2.3 <i>Principales tecnologías para la Desalinización</i>	2-8
2.3.1 <i>Destilación</i>	2-8
2.3.2 <i>Congelamiento</i>	2-12
2.3.3 <i>Ósmosis Inversa</i>	2-13
2.3.4 <i>Electrodiálisis e Intercambio Iónico</i>	2-13
2.3.5 <i>Combinaciones de procesos de desalinización</i>	2-15
2.4 <i>Manejo de Salmueras</i>	2-15
3. ASPECTOS PRIMORDIALES DE LA DESTILACIÓN SOLAR	3-1
3.1 <i>Otras formas de aprovechamiento de la Energía Solar en sistemas de desalinización del agua</i>	3-6
3.2 <i>Modelos de Transporte de Calor y Masa en Destiladores Solares</i>	3-11
4. APLICACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A LA DESTILACIÓN SOLAR	4-1
4.1 <i>Transpiración vegetal.</i>	4-2
4.2 <i>Evapotranspiración en Invernaderos.</i>	4-8
5. METODOLOGÍA	5-1
5.1 <i>Pruebas preliminares en dispositivo experimental de destilación</i>	5-1
5.2 <i>Desarrollo de un parámetro adimensional</i>	5-3
5.3 <i>Pruebas experimentales piloto en Casetas de Desalinización</i>	5-5
5.3.1 <i>Diseño y Construcción de la Caseta de Desalinización y sus elementos</i>	5-5
5.3.2 <i>Elementos del sistema de Evapotranspiración</i>	5-7
5.3.3 <i>Desarrollo experimental</i>	5-10

6. RESULTADOS	6-1
6.1 Pruebas preliminares en dispositivo experimental de destilación	6-1
6.2 Desarrollo de un Número Adimensional	6-4
6.3 Pruebas experimentales piloto en Casetas de Desalinización	6-9
6.3.1 Resultados del Experimento 1:	
Verificación de semejanza en las respuestas de las Casetas A y B	6-9
6.3.2 Resultados del Experimento 2:	
Evaluación de la producción de agua destilada al incrementar el área de evapotranspiración aplicando superficies porosas (tela de algodón)	6-10
6.3.3 Resultados del Experimento 3:	
Evaluación de las concentraciones en la producción de agua destilada y en la salmuera con la mejor área de evapotranspiración	6-12
6.4 Discusión de Resultados	6-13
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	7-1
7.1 Conclusiones	7-1
7.2 Recomendaciones	7-3

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXO ANÁLISIS DE VARIANZA EN RESULTADOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES EN CASETAS DE DESALINIZACIÓN

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de las aguas por su salinidad	2-2
Tabla 2.2 Concentración de solutos sólidos del agua de mar	2-2
Tabla 2.3 Propiedades termodinámicas del agua de mar con 35,000 mgL ⁻¹ a 20°C	2-3
Tabla 5.1 Características de los sensores meteorológicos	5-2
Tabla 5.2 Concentración de sales en los tipos de agua experimentados.	5-3
Tabla 5.3. Características comparativas relevantes entre policarbonato y vidrio	5-6
Tabla 5.4. Niveles del tratamiento Experimento 2	5-11
Tabla 5.5. Niveles del tratamiento Experimento 3	5-13
Tabla 6.1 Intervalo de valores en los parámetros ambientales medidos	6-2
Tabla 6.2 Resultados del experimento de comparación de funcionamiento de las Casetas de Desalinización A y B	6-9
Tabla 6.3 Producción bruta de agua destilada (mldía ⁻¹) aplicando los tratamientos	6-10
Tabla 6.4 Análisis de Varianza respecto a producción bruta de agua destilada	6-11
Tabla 6.5 Resultados de concentración de sales	6-12
Tabla 6.6 Resultados de la prueba de significancia por parejas	6-13

INDICE DE FIGURAS

<i>Fig. 1.1 Disponibilidad de agua dulce</i>	1-2
<i>Fig. 1.2 Cálculos del incremento del estrés de agua en el mundo</i>	1-3
<i>Fig. 1.3 Contraste regional entre el desarrollo y la disponibilidad de agua, 2007</i>	1-5
<i>Fig. 1.4 Regiones en México con potencial de aplicación de la desalinización de agua salinas o salobres</i>	1-5
<i>Fig. 2.1 Salinidad promedio en mares y océanos.</i>	2-1
<i>Fig. 2.2 Marineros griegos produciendo agua destilada a partir de agua de mar</i>	2-4
<i>Fig. 2.3 Destilador solar portátil patentado por María Telkes</i>	2-5
<i>Fig. 2.4 Distribución Internacional de los Usuarios del Mercado de Desalinización</i>	2-6
<i>Fig. 2.5 Evolución del costo en la Desalinización por Membranas</i>	2-7
<i>Fig. 2.6 Destilación de Múltiple Efecto (DME)</i>	2-9
<i>Fig. 2.7 Destilación Súbita en Múltiple Etapa (DSME)</i>	2-10
<i>Fig. 2.8 Destilación por compresión de vapor (DCV)</i>	2-11
<i>Fig. 2.9 Destilador Solar</i>	2-11
<i>Fig. 2.10 Destilador por congelamiento del agua.</i>	2-12
<i>Fig. 2.11 Proceso de Ósmosis Inversa</i>	2-13
<i>Fig. 2.12 Desalinización por cargas iónicas</i>	2-13
<i>Fig. 2.13 Sistema de Ósmosis Inversa acoplada a Planta Termoeléctrica</i>	2-14
<i>Fig. 3.1 Prototipo de Destilador Solar</i>	3-1
<i>Fig. 3.2 Esquema de un destilador solar activo integrado a un colector solar</i>	3-3
<i>Fig. 3.3 Destilador solar con reflector externo</i>	3-4
<i>Fig. 3.4 Esquema de un destilador solar integrado a torres de enfriamiento</i>	3-5
<i>Fig. 3.5 Condensación bajo suelo de aire húmedo por evaporación de agua salina</i>	3-5
<i>Fig. 3.6 Destilador solar con sistema de humidificación-dehumidificación</i>	3-6
<i>Fig. 3.7 Diagrama esquemático del destilador solar con sulfito de sodio, como material que cambia de fase</i>	3-7
<i>Fig. 3.8 Laguna solar con gradiente de salinidad</i>	3-8
<i>Fig. 3.9 Aprovechamiento de energía de un destilador solar en chimenea</i>	3-9
<i>Fig. 3.10 Destiladores solares para remoción de fluoruros en Ghana</i>	3-10
<i>Fig. 3.11 Destilador solar pasivo con medición de proyección de sombras</i>	3-14
<i>Fig. 4.1 Diagrama explicativo de la Evapotranspiración</i>	4-1
<i>Fig. 4.2 Modelo de compartimientos para las relaciones hídricas de un cultivo</i>	4-3
<i>Fig. 4.3 Estoma</i>	4-5
<i>Fig. 4.4 Demostración de la teoría coheso-tenso-transpiratoria</i>	4-7
<i>Fig. 4.5 Aprovechamiento de energía solar con plántulas en un invernadero</i>	4-10
<i>Fig. 4.6 Sistemas de desalinización de agua integrados al techo de un invernadero.</i>	4-11
<i>Fig. 5.1 Unidad experimental de Destilación Solar</i>	5-1
<i>Fig. 5.2 Detalles de la construcción de las Casetas de Desalinización Solar</i>	5-6

<i>Fig. 5.3</i>	<i>Termómetro ambiental para mediciones al exterior de la Caseta</i>	5-7
<i>Fig. 5.4</i>	<i>Adquisidores de datos meteorológicos</i>	
	<i>a) Piranómetro para medición de radiación solar</i>	5-7
	<i>b) Sensores de temperatura, luminosidad y humedad relativa</i>	5-7
<i>Fig.5.5</i>	<i>Canaletas de agua salina o salobre, comunes a las Casetas de Desalinización Solar</i>	5-8
<i>Fig. 5.6</i>	<i>Sistema de Evapotranspiración de la Caseta de Desalinización Solar A</i>	5-9
<i>Fig. 5.7</i>	<i>Verificación de semejanza en funcionamiento de Casetas</i>	5-10
<i>Fig. 5.8</i>	<i>Casetas de Desalinización de Evapotranspiración y de Evaporación</i>	5-12
<i>Fig. 5.9</i>	<i>Recuperación de destilado en Casetas de Desalinización</i>	5-12
<i>Fig. 6.1</i>	<i>Unidades de experimentación nivel laboratorio.</i>	
	<i>Material poroso: tela de algodón</i>	6-1
<i>Fig.6.2</i>	<i>Destilador solar con un elemento sólido de absorción</i>	
	<i>Material poroso: hule espuma de poliuretano</i>	6-2
<i>Fig. 6.3.</i>	<i>Parámetros meteorológicos medidos en días consecutivos de sol y lluvia, en la Ciudad de México, septiembre de 2010</i>	6-3
<i>Fig. 6.4</i>	<i>Resultado de la aplicación del parámetro adimensional, considerando diferentes concentraciones de salinidad</i>	6-6
<i>Fig. 6.5</i>	<i>Incremento de producción de agua destilada cuando aumenta el área de evaporación en la misma superficie de terreno</i>	6-7
<i>Fig. 6.6</i>	<i>Resultado de la aplicación del parámetro adimensional, considerando diferentes condiciones de radiación solar</i>	6-8
<i>Fig. 6.7</i>	<i>Formación de cristales en salmueras de alta concentración</i>	6-12
<i>Fig. 6.8</i>	<i>Reducción de temperatura en agua por efecto de sombreado</i>	6-14
<i>Fig. 6.9</i>	<i>Representación esquemática de los resultados del diseño de experimentos</i>	6-15

1. INTRODUCCIÓN

“Ninguna de las nuevas tecnologías parece lo bastante simple y barata para ofrecer esperanzas a la gente que vive en la pobreza.”...“buscando maneras de llevar agua dulce a la región sudanesa de Darfur, devastada por la guerra, he preguntado en cada congreso de la industria de la desalinización: ¿qué pasaría si estuvieran en un pueblo de 3000 habitantes y el agua se hallara 300 metros bajo tierra, cargada de sal y no hubiera electricidad? - Se quedan con la boca abierta - dice el geólogo Farouk El-Baz, de la Universidad de Boston. Fuente: National Geographic, Abril 2010

El ciclo del agua nos enseña que la forma natural de obtener agua potable, es a partir de la destilación solar, desde el gran reservorio terrestre formado por los mares y océanos. Y a pesar de que en el proceso, se evapora agua dejando en el reservorio las sales no volátiles, no hay evidencia geológica de que haya aumentado la concentración de sales en el agua de mar en millones de años. Aparentemente, el retorno del agua dulce de ríos, acuíferos y la propia lluvia, ha servido para mantener las concentraciones promedio estables y rige las diferencias de concentración de sales que se observa en zonas cercanas al casquete polar, en las playas y en los profundos océanos (Spiegler, 1977). Parece que no hubiera mejor respuesta a Farouk El-Baz, para poblaciones con acceso solo a agua salada y sin disponibilidad de electricidad: la destilación solar es la alternativa.

También en México tenemos poblaciones en extensas zonas áridas y semiáridas con grandes requerimientos de agua, que suman casi 3 millones de personas (Martínez Pereda *et al.*, 2010). La revisión de las condiciones del agua en las cuencas en México, indica que existen cuerpos de agua (superficial, subterránea y marítima), que no se aprovechan debido a su calidad, pero del mismo modo, la revisión de las tecnologías existentes indican que existen los métodos probados para extraer y acondicionar la calidad del agua para incorporarlas a los sistemas de suministro.

Entre los principales sistemas de desalinización aplicados a gran escala, encontramos la ósmosis inversa y la destilación térmica, donde la producción de agua potable está limitada por el consumo de energía y en ello se concentran los mayores esfuerzos en la carrera tecnológica. En pequeña escala encontramos la destilación solar, donde el consumo de energía tiene su base en la energía solar y su limitación a gran escala se encuentra asociada a las grandes superficies territoriales requeridas para suministro de agua de una población.

La idea central de esta propuesta combina los elementos establecidos en la destilación solar y en la evapotranspiración de las plantas, que es evaporación con energía solar con un sistema natural, pero modificado, llevado a cabo con materiales porosos, evitando así la problemática del crecimiento vegetal en condiciones de alta salinidad.

Este sistema emulador de la evapotranspiración tiene como propósito utilizar fuerzas de capilaridad, cohesión y adhesión para formar delgadas láminas de agua y la exposición a un dispositivo de evaporación con base en la energía solar. Así, se aumenta el área de evaporación del destilador solar, logrando la producción de mayor cantidad de agua en la misma superficie de terreno.

Con este sistema, se lograría contar con un sistema de producción de agua potable aplicable a zonas rurales áridas de México, con fuentes de agua de abastecimiento a la población que no se aprovechen actualmente por sus altos contenidos de sales solubles, incluyendo aguas salinas y salobres, que sea de bajo consumo energético, como es la destilación solar y que disminuya la superficie de terreno que debe ser aplicada a la producción del agua, que es el actual factor limitante de este tipo de sistemas.

1.1 Justificación: La demanda de agua

La Tierra, con sus diversas y abundantes formas de vida, que incluyen ya a 7,000 millones de seres humanos, se enfrenta en este comienzo del siglo veintiuno con una grave crisis del agua (Fig. 1.1).

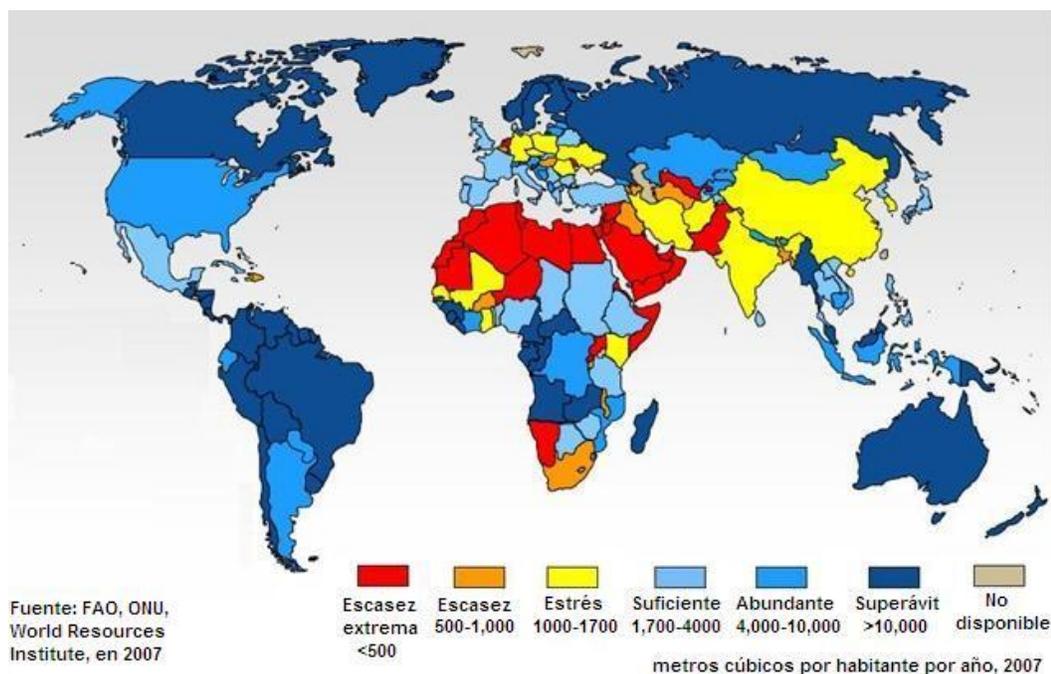


Fig. 1.1 Disponibilidad de agua dulce

Los hidrólogos suelen evaluar la escasez mediante la observación de la ecuación población-agua. Lo convencional es considerar que el umbral nacional para satisfacer los requerimientos de agua para la agricultura, la industria, la energía y el medio ambiente es 1,700 metros cúbicos por persona. Se entiende que la disponibilidad por debajo de los 1,000 metros cúbicos representa un estado de “estrés por falta de agua”, y por debajo de los 500 metros cúbicos, “escasez absoluta” (PNUD, 2006).

Hoy, alrededor de 700 millones de personas en 43 países viven por debajo del umbral de estrés de agua. Con una disponibilidad promedia anual de aproximadamente 1,200 metros cúbicos por persona, el Medio Oriente es la región del mundo más afectada por el estrés de agua. Sólo Irak, Irán, Líbano y Turquía se encuentran por encima de ese umbral. Los palestinos, especialmente los habitantes de Gaza, experimentan uno de los casos de escasez de agua más graves del mundo: aproximadamente 320 metros cúbicos por persona. El África subsahariana es la región que incluye la mayor cantidad de países que sufren estrés de agua. Hoy día, casi una cuarta parte de la población del África subsahariana vive en un país que sufre estrés de agua y esta proporción está aumentando (Fig. 1.2).

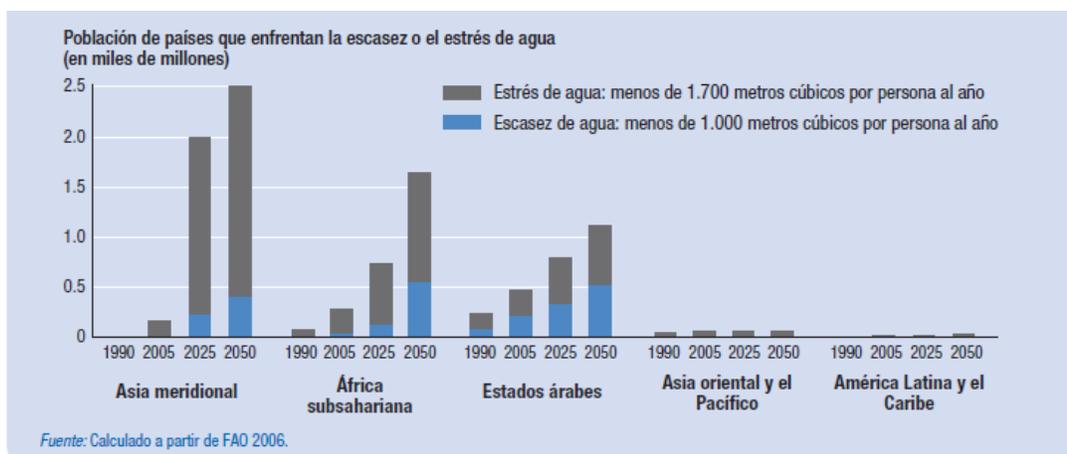


Fig. 1.2 Cálculos del incremento del estrés de agua en el mundo

La escasez de agua es percibida ampliamente como la gran característica definitoria de la inseguridad de agua. Las preocupaciones sobre el hecho de que el mundo “se está quedando sin agua” se expresan con una frecuencia cada vez mayor. Pero la escasez resulta un factor tanto engañoso como restrictivo al analizar la inseguridad de agua. Es engañoso, porque mucho de lo que parece ser escasez es una consecuencia inducida por políticas de la mala gestión de los recursos hídricos. Además, resulta un factor restrictivo porque la disponibilidad física de agua es sólo una dimensión del tema de la inseguridad de agua (PNUD, 2006).

Las teorías económicas clásicas sobre crecimiento se basaban en la idea, un tanto errónea, de que el límite del desarrollo lo determina la disponibilidad de los recursos. Los modelos se inspiraban en un fenómeno agrario de explotación y tenencia de la tierra; mientras existen tierras, todos los individuos de una población pueden obtener el producto necesario, pero cuando el cultivo y explotación de ésta es insuficiente, entonces la población ha excedido sus límites de crecimiento. Esta condición se relaciona a otra singular peculiaridad asociada a la cantidad de los recursos: “su escasez incrementa su costo”. Así, si la abundancia de un recurso significa oportunidades de crecimiento, su escasez alerta al interés por el recurso, el cual motiva al ingenio del hombre, promueve la ciencia y los desarrollos tecnológicos.

La historia permite apreciar que, en todos los casos, tras un aparente agotamiento del recurso, se presenta un importante repunte en el aprovechamiento del mismo. Pareciera que los límites determinados por la disponibilidad del recurso fueran elásticos. Este fenómeno de límite elástico no es, sino una consecuencia de la aplicación de nuevos desarrollos tecnológicos en el manejo de los recursos (Martínez Pereda *et al.*, 2010).

Se considera, en esta línea de investigación, que la solución al problema de abastecimiento de agua debe darse con los recursos propios, mediante la aplicación de la tecnología apropiada, es decir, los límites de disponibilidad del recurso deben ser expandidos aplicando CIENCIA Y TECNOLOGÍA. Y las tecnologías deben ser dominadas en el país, evitando las problemáticas que se viven en otros campos por la dependencia tecnológica.

La República Mexicana enfrenta un importante reto en el desarrollo de las zonas áridas y semiáridas debido a la escasez de uno de los recursos más valiosos: el agua. En México, la distribución espacial del agua de lluvia ocasiona que se formen zonas áridas en alrededor del 42% del territorio de la República Mexicana (CONAGUA, 2008a, CONAGUA, 2008b).

Estas zonas se han formado donde la precipitación pluvial es inferior a los 500 mm, principalmente en los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, San Luis Potosí, Hidalgo, Estado de México y las entidades que comparten la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, donde además, la productividad y el crecimiento industrial han crecido, formando polos de desarrollo hacia donde la población ha migrado, ocasionando mayor presión en la demanda de agua (*Fig. 1.3*). Asimismo, existen necesidades de suministro en zonas de crecimiento turístico, como Yucatán y Quintana Roo, que tienen una demanda creciente de agua (CONAGUA, 2008c).

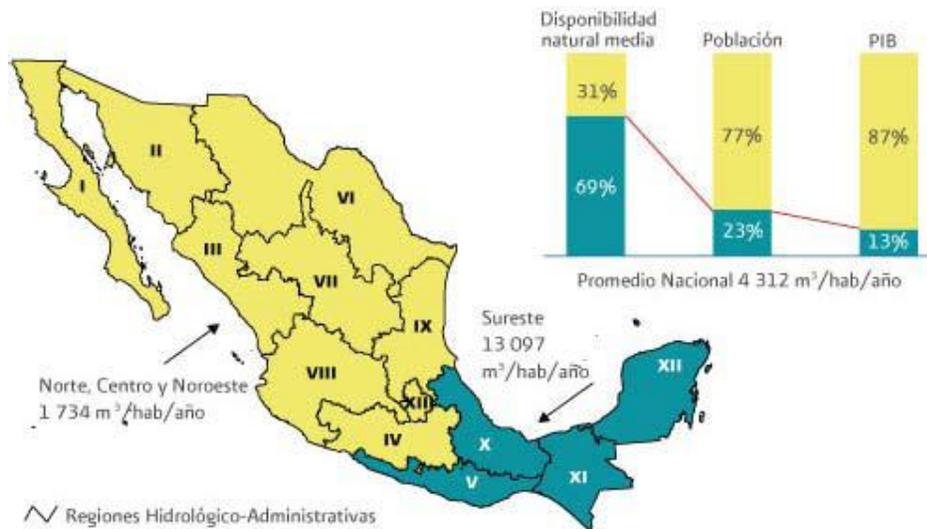


Fig. 1.3 Contraste regional entre el desarrollo y la disponibilidad de agua, 2007
 FUENTE: CONAGUA. Subdirección General de Programación. México, 2005.

Los recursos disponibles para estas zonas, son (sin ser esta una lista exhaustiva), modificado de Arreguín y Martín, en 2000 (Fig. 1.4):

- Litorales que proporcionen agua de mar a entidades como Baja California, Baja California Sur, Sonora, Tamaulipas, Yucatán y Quintana Roo.
- Acuíferos salobres como los que existen en Sonora, Chihuahua, Coahuila, Tamaulipas, Zacatecas, Aguascalientes y la Ciudad de México.
- Cuerpos de agua superficiales o subterráneos contaminados con iones metálicos, como en Coahuila, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala y Lerma Santiago.



Fig. 1.4 Regiones en México con potencial de aplicación de la desalinización de agua salina o salobres

Por estas necesidades, en México se aplicó un Plan de Desalinización en la década de los 1970, con destiladores solares de caseta (Rubio, Fernández Zayas, 2005; Bermúdez-Contreras, *et al.* 2008). Además, se construyeron plantas en la década de 1980 en Coahuila, que por fallas en los motores, operaron hasta 1993. Se instalaron 13 plantas de compresión de vapor en Baja California, 5 de ósmosis inversa, destiladores de una etapa y destilación súbita en múltiple etapa (DSME).

A partir de 1983, esfuerzos intensivos se realizaron en un proyecto conjunto del Instituto de Ingeniería de la UNAM con el Instituto Tecnológico de la Paz, donde se desarrolló un grupo de investigación que permitió dotar de agua desalinizada a las instalaciones del Instituto en Baja California Sur y producir investigación de alto nivel, además de otras colaboraciones con la UBCS, que rindieron profundas enseñanzas sobre la aplicación de destiladores solares en comunidades mexicanas (Chargoy del Valle, Fernández Zayas, 2010)

Posteriormente, se han instalado, principalmente, plantas de ósmosis inversa que ya abastecen núcleos importantes de población en Q. Roo, B.C., Coah., Zac., Son., Tam., N.L. (Arreguín, Martín, 2000). Por su parte, la industria comenzó a instalar principalmente sistemas de osmosis inversa para obtener agua de proceso o potable, en proporciones considerables. Y la tendencia es aumentar el abasto de nuevos desarrollos turísticos e industriales apoyados en desalinización.

1.2 Hipótesis

El proceso de Evapotranspiración puede ser reproducido físicamente en un sistema de Destilación Solar para el mejoramiento de la calidad del aguas salinas y salobres, hasta producir agua potable.

Si se aplican dispositivos para la absorción en el recipiente de agua salina o salobre como lo hacen las raíces, se conduce el agua salina por los espacios entre hilos de las telas, funcionando como tubos capilares como el xilema, aprovechando las fuerzas de adhesión-cohesión, reduciendo la tensión superficial y se promueve la evaporación de aguas con alto contenido de sales solubles en superficies de gran área superficial, como sucede en las hojas, pero con superficies porosas como telas, utilizando los recursos disponibles de los sistemas de destilación solar en construcciones tipo invernadero, será factible obtener agua potable reduciendo significativamente la superficie de terreno destinada al tratamiento.

Así, el flux es reproducido por un material formado por hilos, como una tela, que tiene un flux de evapotranspiración en $\text{kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{tela d}^{-1}$, definido en este trabajo como E_t . Este flux de evapotranspiración E_t , ($\text{kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{tela d}^{-1}$), será directamente proporcional a la diferencia de temperaturas exterior e interior del invernadero y el coeficiente de proporcionalidad aumentará en forma directa, con el área superficial de evapotranspiración (A_{se}), no así con la superficie de terrenos.

$$E_t \propto \Delta T$$

y

$$E_t \propto A_{se}$$

donde:

E_t : Flux de evapotranspiración [$\text{kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{tela d}^{-1}$]

ΔT : Diferencia de temperaturas exterior e interior del invernadero [K]

A_{se} : Área superficial de evapotranspiración [m^2]

1.3 Objetivo

Objetivo General

Determinar el potencial de mejoramiento de la calidad de agua de aguas salinas y salobres mediante un sistema de evapotranspiración y de destilación solar.

Objetivos Específicos

1. Desarrollar el proceso de Evapotranspiración dentro de un sistema de destilación solar, aplicado en un dispositivo piloto de pruebas experimentales, utilizando un sistema de absorción, conducción capilar y proporcionando superficie de evaporación con base en un sistema de telas.
2. Obtener las relaciones entre los parámetros involucrados en la evapotranspiración de un modelo físico aplicado para desalinizar agua salina y salobre, mediante un número adimensional.
3. Determinar la reducción de la superficie de terreno requerida para la destilación solar, mediante la aplicación del proceso de evapotranspiración.

1.4 Alcances y limitaciones

1. Se desarrolló un dispositivo de pruebas en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería, UNAM.
2. Se utilizó agua sintética preparada artificialmente en el laboratorio, con base en productos comerciales de cloruro de sodio proveniente del mar, disuelto en agua destilada, conforme las concentraciones de agua salina de las costas de México ($35,000 \text{ mg L}^{-1}$).
3. Los experimentos de destilación solar con base en evapotranspiración se realizaron en Ciudad Universitaria, utilizando dos casetas de desalinización construidas de manera idéntica, y ubicadas en el techo del Edificio de Posgrado e Investigación de la Facultad de Ingeniería, UNAM, de forma que se realizaron experimentos pares en las mismas condiciones meteorológicas, que

permitieran comparar los tratamientos en forma independiente por el incremento en producción de agua destilada.

4. Se utilizó un solo tipo de tela de algodón de tejido abierto (conocido como pañalina), con poros de 0.5 mm de diámetro, para comprobar la hipótesis.

1.5 Estructura del Trabajo

El trabajo escrito está dividido en una parte de antecedentes teóricos y en una parte de experimentación práctica. Los antecedentes teóricos comienzan en el capítulo 2 con una revisión de conceptos generales de la desalinización, incluyendo las características de las aguas salinas y salobres, algunos aspectos históricos de la desalinización hasta las condiciones actuales del mercado de la desalinización en el mundo, así como una descripción de los principales procesos utilizados para desalinizar agua y una breve descripción del manejo de salmueras. En el capítulo 3 se explican las partes y el funcionamiento de un destilador solar, con énfasis a los múltiples trabajos en torno al mejoramiento del diseño de destiladores solares y a los modelos matemáticos que explican y simulan su funcionamiento. No se dejó de lado una breve descripción de otras aportaciones de usos de la energía solar en destiladores. Ya en el capítulo 4 se hace una revisión del proceso de evapotranspiración y se presentan algunos ejemplos de la aplicación de la evapotranspiración a la destilación solar, en todos los casos utilizando plantas.

La determinación del potencial de mejoramiento de la calidad de agua de aguas salinas y salobres mediante un emulador del proceso de evapotranspiración, requirió diversas actividades teóricas y experimentales que permitieran identificar las variables que principalmente participan en el proceso, la forma en la que teóricamente se correlacionan, para lo cual se desarrolló un número adimensional, pruebas experimentales a nivel laboratorio para definir variables de control y finalmente, las pruebas experimentales en piloto, para comprobar la hipótesis de este trabajo de investigación. La metodología para el desarrollo de tales actividades se presenta en el capítulo 5, los resultados y su discusión en el capítulo 6 y, finalmente, las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación se presentan en el capítulo 7. Después de las referencias bibliográficas se encuentra el anexo con el análisis estadístico de los resultados en detalle.

2. CONCEPTOS GENERALES DE DESALINIZACIÓN

La desalinización es la acción y efecto de quitar la sal del agua de mar o de las aguas salobres, para hacerlas potables o útiles para otros fines, según el Diccionario de la Real Academia Española (2011), concepto que queda englobado en desalación, la cual es una acción más genérica que implica quitar sal a algo, como cecina o pescado.

En este capítulo se presenta una revisión de conceptos generales de la desalinización, incluyendo las características de las aguas salinas y salobres, algunos aspectos históricos hasta las condiciones actuales del mercado en el mundo, así como una descripción de los principales procesos utilizados para la separación de la sal y el agua.

2.1 Características de aguas salinas y salobres

El 97.5% del agua que existe en nuestro planeta es salada, del 2.5% restante, el 80% está congelada y sólo una cantidad inferior al 1% del total, es apta y disponible para el consumo humano en ríos, lagos y acuíferos (Cipollina *et al.*, 2009).

El agua del mar es un ejemplo de mezcla homogénea. Es salada porque tiene sales minerales, que son sólidos disueltos, en concentraciones que están entre 10,000 (como el Mar Báltico) y 45,000 mg L⁻¹ (como el Golfo Pérsico) hasta llegar a >100,000 mg L⁻¹ en casos como el Mar Muerto (271,000 mg L⁻¹ según Spiegler, 1977), aunque se considera que la mayor parte está en un promedio de 35,000 mg L⁻¹ (Fig. 2.1).

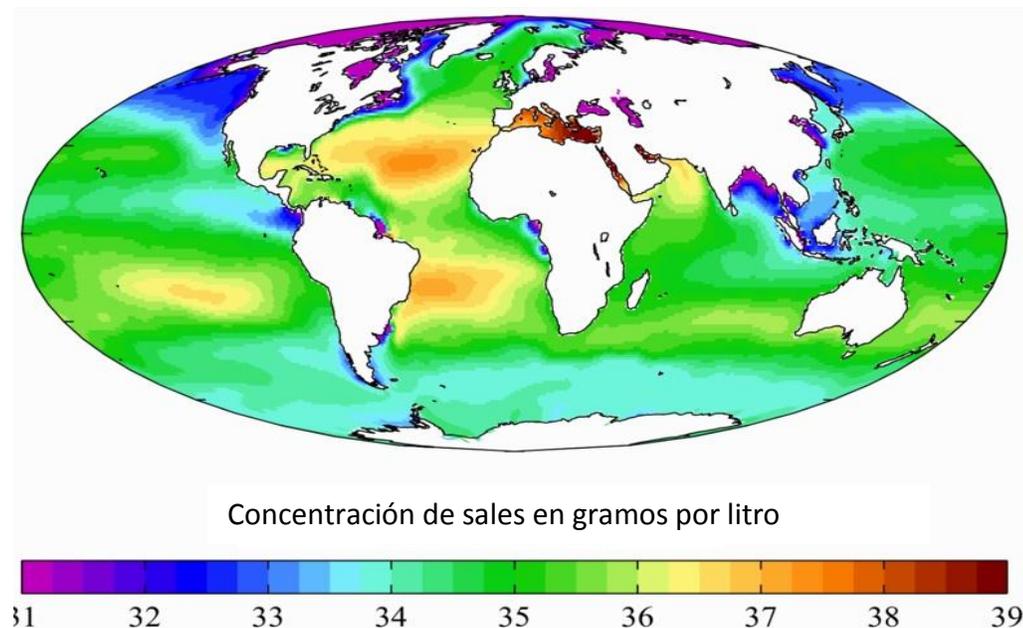


Fig. 2.1 Salinidad promedio en mares y océanos.

Fuente: <http://aquarius.gsfc.nasa.gov/overview-sss.html>

La categoría de agua salobre se aplica a concentraciones menores de sales disueltas, pero suficientemente altas para descalificar su uso en consumo humano (>1000 mgL⁻¹ según la NOM-127-SSA1-1994) y para riego agrícola. Las principales fuentes de aguas salobres son acuíferos sobreexplotados, especialmente en zonas áridas y semiáridas donde la alta evaporación del agua provoca la concentración de sales en el suelo. Las salmueras son el típico residuo líquido de la evaporación y, recientemente, se aplica al rechazo de la filtración por ósmosis inversa, siempre con un contenido de sales mayor que la fuente original de agua salina o salobre (ver Tabla 2.1).

TABLA 2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS POR SU SALINIDAD

Agua dulce	Agua salobre	Agua de mar	Salmuera
< 0.15%	0.15 – 1%	1 – 4.5%	> 4.5%
< 1500 mg L ⁻¹	1500 – 10,000 mg L ⁻¹	10,000 – 45,000 mg L ⁻¹	> 45,000 mg L ⁻¹

Fuente: Cipollina, Micale, Rizzuti (2009) *Seawater Desalination*, Ed. Springer

Debido a la presencia de estas sales minerales, el agua del mar no es potable para el ser humano y su ingestión en grandes cantidades puede llegar a provocar la muerte (OMS, 2007). Por otra parte, tampoco puede ser usada en riego agrícola, debido a que la salinización del suelo provoca estrés hídrico en las plantas, al punto de provocar su marchitamiento, ni puede aprovecharse en una gran diversidad de usos industriales (Richards, 1954).

La composición promedio del agua de mar se presenta en la Tabla 2.2 (Spiegler, 1977). Hay que resaltar que, si bien la cantidad de sales varía en diferentes partes del mundo, la composición es esencialmente constante en el mundo y diferente a la composición de agua de río, la cual con dificultad contendrá un 16% de cloruro de sodio, mientras que el bicarbonato de calcio es casi el 50% y los silicatos el 15% (Cipollina *et al.*, 2009). Sin embargo, aún las pequeñas cantidades de bicarbonatos y sulfatos de magnesio y calcio en agua marina, ocasionan incrustaciones en la mayor parte de los procesos de desalinización.

TABLA 2.2. CONCENTRACIÓN DE SOLUTOS SÓLIDOS DEL AGUA DE MAR

Aniones	mg L ⁻¹	Cationes	mg L ⁻¹
Cloruros (Cl ⁻)	18,980	Sodio (Na ⁺)	10,561
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	2,649	Magnesio (Mg ⁺⁺)	1,272
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	142	Calcio (Ca ⁺⁺)	400
Bromuros (Br ⁻)	65	Potasio (K ⁺)	380
Fluoruros (F ⁻)	1.27	Estroncio (Sr ⁺⁺)	7.58
Molécula no disociada		Ácido bórico (H ₃ BO ₃)	26.2

Las propiedades termodinámicas del agua de mar son importantes en el diseño de una planta desalinizadora, en particular, por los cambios producidos por las propiedades coligativas (las producidas por un elevado número de partículas), así se manifiesta en el valor de la presión osmótica, en el caso de los procesos de membrana y en el incremento del punto de ebullición, en caso de destilación. Las principales características se presentan en la Tabla 2.3.

TABLA 2.3. PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AGUA DE MAR
CON 35,000 mg L⁻¹A 20°C

Densidad	kg m ⁻³	1.024
Viscosidad	kg m ⁻¹ s ⁻¹	1.074 x 10 ⁻³
Calor específico	kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹	3.998
Presión osmótica	kPa	2700
Elevación del punto de ebullición, 20°C	°C	0.32
Elevación del punto de ebullición, 100°C	°C	0.51

Fuente: Cipollina, Micale, Rizzuti (2009)

2.2 Historia de la desalinización

Entre las aportaciones más importante de las tecnologías a la humanidad, ante la escasez de agua potable, ha sido el conseguir potabilizar el agua del mar, especialmente cuando no existe otro recurso, ya que en otros ámbitos han sido también muy valiosas las prácticas y políticas del mejor aprovechamiento y reuso de las actuales fuentes de suministro de agua.

Algunos autores hacen referencia a los usos que daban los antiguos griegos al proceso de la desalinización solar desde hace más de dos mil años, pues se sabe que conocían el efecto de invernadero y el empleo de materiales semitransparentes como una variedad del ónix y diversas resinas petrificadas como el ámbar (Chargoy del Valle, Fernández Zayas, 2010).

Se menciona que Alejandro de Afrodiasias (193-217 d.C.), al comentar la Meteorológica de Aristóteles (384-322 a.C.), describe que ya había explicado el procedimiento de destilación (evaporación-condensación) como método de obtención de agua dulce a partir de agua de mar, método usado por marinos griegos del siglo IV AC, como se muestra en la Fig. 2.2 (Kalogirou, 2005); y en el siglo VIII de nuestra era, un escritor español de nombre Francisco Vallés escribió un tratado sobre destilación. En la séptima década del siglo XIX, el desarrollo de la navegación a vapor aumentó la demanda de agua potable para las calderas de los barcos (Gamarra, 2007).



Fig. 2.2 Marineros griegos produciendo agua destilada a partir de agua de mar

La primera experiencia práctica de desalinización industrial de agua marina fue en el puerto de Adén (Mar Rojo) por iniciativa del Reino Unido de la Gran Bretaña, para suministrar a sus barcos que surcaban el Mar Rojo, y se remonta al año 1869 (Blanquer, 2004). No mucho después, en 1874, Jardine proyectó un sistema que fue construido por Charles Wilson en la zona minera de Las Salinas, cerca de Antofagasta, Chile. El destilador cubría 4700 m² y producía hasta 23,000 litros de agua dulce en un día soleado, a una altitud de 1300 msnm. Este destilador estuvo funcionando durante 40 años, mientras duró la producción minera (Meinel, Meinel, 1982).

Las plantas desalinizadoras de agua de mar han producido agua potable durante muchos años. Sin embargo, hasta hace poco la desalinización sólo se ha empleado en circunstancias extremas debido al altísimo consumo de energía del proceso que implica el elevado calor de vaporización del agua. Se basaban en la destilación y produjeron agua para consumo humano en gran escala en la década de 1940 en Kuwait, Aruba y las Antillas Holandesas.

Las primeras plantas desalinizadoras utilizaban diversas tecnologías de evaporación. Las desalinizadoras por evaporación más avanzadas, de múltiples etapas, tienen un consumo de energía mayor de 9 kW h por metro cúbico de agua potable producido. Por esta razón, inicialmente las grandes desalinizadoras de agua de mar se construyeron en lugares en los que el costo de la energía era muy bajo, como el Oriente Medio, o cercanos a plantas de procesamiento con calor sobrante disponible.

Mientras que los países desarrollados como Alemania, Holanda, Gran Bretaña, Israel, avanzaban en la destilación térmica, ósmosis inversa y electrodiálisis, países pobres con escasez de agua participaban en la investigación de la destilación solar. Así en África, Argelia tiene un prototipo desarrollado por Cyril Gomella desde 1955, que sirvió para mejorar el diseño y construir al menos un centenar de destiladores solares en estaciones experimentales y edificios públicos. También en Italia se hacían esfuerzos, pues en el sureste gozaban de alta radiación solar, pero pocos recursos

hídricos, lo mismo que en España, que inició los estudios de radiación solar y desalinización en Almería, teniendo su planta representativa en las Islas Canarias. En Estados Unidos y en la, entonces, Unión Soviética, se probaron todos los métodos y consideraban la destilación solar útil en casos especiales, i.e. ante la carencia de combustible (U.S. Office of Saline Water, 1958).

El interés mostrado en Estados Unidos, que llevó a la creación de la Oficina de Agua Salina, tuvo una amplia participación en la investigación y organización de encuentros internacionales (U.S. Office of Saline Water, 1965). Una de las agentes más productivas es la conocida como la “Dama del Sol”, la investigadora María Telkes (1900-1995), quien entre sus múltiples aplicaciones de la energía solar, desarrolló dispositivos para destilación de agua salina (Fig. 2.3), inspirada por un viaje a Chile donde conoció su planta desalinizadora. Sus dispositivos fueron publicados por la Oficina de Agua Salina y construidos por la Curtis-Wright Corporation (Telkes, 1956, 1959a, 1959b).

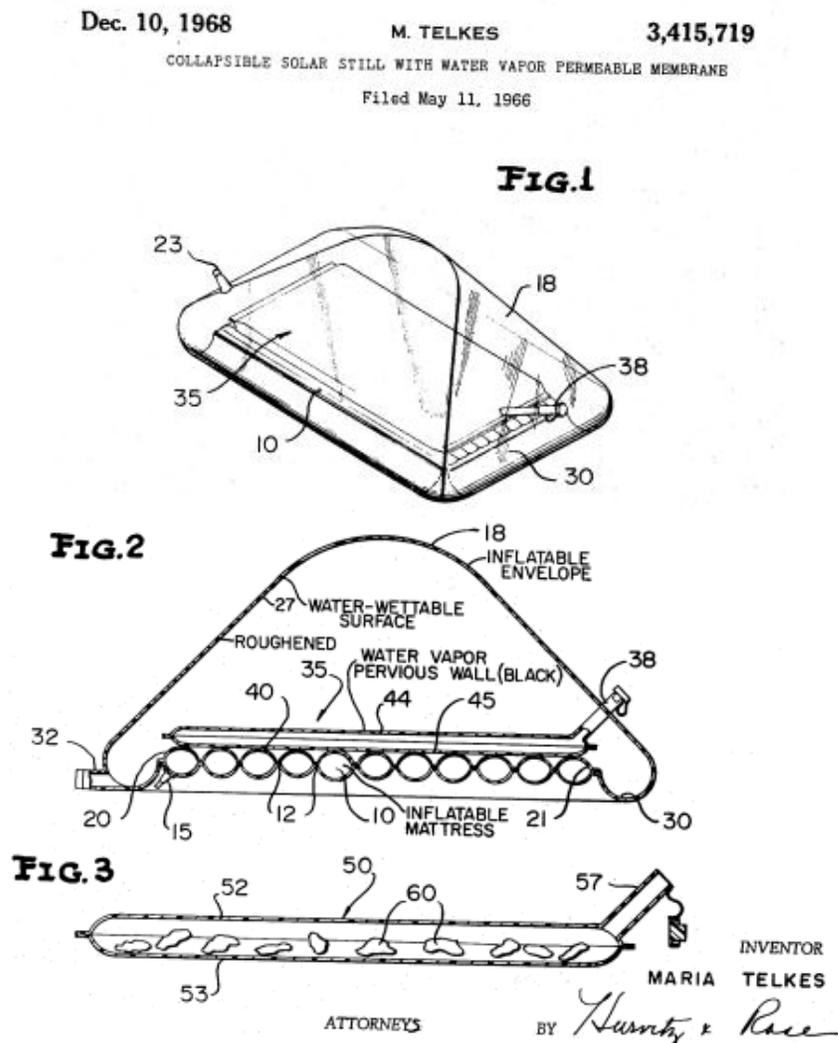


Fig. 2.3 Destilador solar portátil patentado por María Telkes

Aunque la patente mostrada de María Telkes es de 1968, fue desarrollada a solicitud del Gobierno de los Estados Unidos, en apoyo a los marinos náufragos de la Segunda Guerra Mundial, que debían sobrevivir varios días antes de un rescate y carecían de agua potable y energía eléctrica.

En España se ha destacado con énfasis la escasez de recursos hidrológicos, que prevalece en toda la franja del Mediterráneo; algunos opinan que no falta agua sino que sobra sal. Por impulso de la iniciativa privada, en el año 1964, se pone en marcha la primera planta de desalinización de agua marina, que se instala en Lanzarote (Islas Canarias) y utiliza el método de la evaporación-condensación. La iniciativa pública es la que emprende la puesta en funcionamiento de la segunda planta desalinizadora en España, hecho que tiene lugar en Ceuta en el año 1969 (Blanquer, 2004). Resulta un ejemplo importante para México, pues desde el 2000, han decidido solucionar su problema de abastecimiento de agua invirtiendo sus recursos de investigación en la producción de sistemas de ósmosis inversa y recientemente en la de membranas (Veza, 2002).

Actualmente, existe una producción de más de 24 millones de metros cúbicos diarios de agua desalinizada en todo el mundo, lo que supone el abastecimiento de más de 100 millones de personas (<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx>), aunque hay estimaciones de hasta 300 millones (*National Geographic*, 2010).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2007), la capacidad mundial de desalinización de agua considerando tanto los sistemas de membrana como la destilación térmica es de más de 40 millones de m³ por día en más de 12 mil plantas, vale \$9,2 mil millones dólares por año, crece a una tasa del 12% anual y se prevé que la capacidad llegue a 94 millones de m³ por día en el año 2015.

A pesar de ser el sistema más costoso para producir agua potable, los gobiernos y las entidades particulares realizan estos importantes montos de inversión, para responder a las demandas de agua en los siguientes usos, como se muestra en la Fig. 2.4, la mayor parte produce agua para usos municipales.

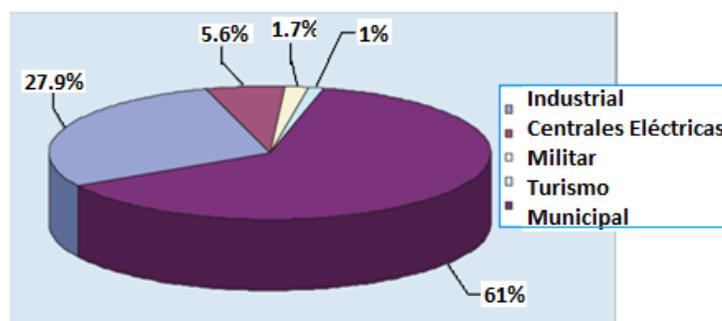


Fig. 2.4 Distribución internacional de los usuarios del mercado de desalinización
FUENTE: AMTA (American Membrane Technology Association), 2007

El interés de gobiernos e instituciones en el desarrollo de la ósmosis inversa, en lugar de la congelación o la destilación para desalinizar agua, se basa en el reconocimiento de su bajo requerimiento de energía. El cálculo de la cantidad de energía teórica (Entalpía) requerida para obtener agua pura, establece que para permear por ósmosis inversa, un metro cúbico de agua de mar se requiere de un gasto de energía 0.76 kWh, mientras que la congelación consume 92 y la destilación 667 kWh (Vega, 2008).

Actualmente el uso de energía para procesar agua salina se encuentra en el intervalo de los 2 a 2.8 kWh por m³ de agua producida (Lechuga 2007), lo que explica el interés en investigación para alcanzar el menor costo energético. Como se observa en la Fig. 2.5, el ahorro en el sistema de ósmosis inversa podrá llegar a los 1.5 y 3 dólares por mil galones, es decir, 5 y 10 pesos por metro cúbico de agua producida a partir de agua salobre y agua de mar, respectivamente.

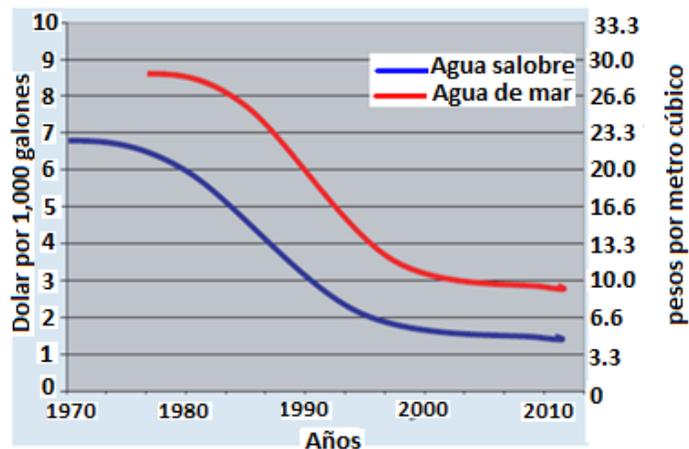


Fig. 2.5 Evolución del costo en la desalinización por membranas
FUENTE: AMTA, 2007

Las diferentes alternativas tecnológicas tienen su razón de ser en un conjunto de circunstancias que las favorecen. No hay una tecnología buena para todos los requerimientos, aunque pueden existir elementos que determinen que se favorezca una tecnología específica. Los principales elementos encontrados hasta ahora son el consumo de hidrocarburos y la economía de escala. El interés en ósmosis inversa, para desalinizar agua, se basa en el reconocimiento de ser el de menor requerimiento de energía con costos aceptables en plantas de gran escala (1000 a 100,000 m³ día⁻¹). Sin embargo, para plantas menores (<50 m³ día⁻¹), los costos de Ósmosis Inversa resultan muy elevados, entrando en competencia la tecnología de Destilación Solar para comunidades pequeñas y abastecimiento doméstico. Es importante considerar los escenarios de insuficiencia de energía eléctrica y aislamiento rural que dificultan la instalación y/o distribución de agua desalinizada por ósmosis inversa. En estos casos, la opción más adecuada será la destilación con base en energía solar para suministro de agua potable en comunidades pequeñas (Martínez *et al.*, 2010).

2.3 Principales tecnologías para la Desalinización

La producción de agua potable a partir de agua salina o salada implica un proceso de separación entre las sales y el agua, que no se produce en forma espontánea. Los sistemas de desalinización se pueden clasificar en aquellos procesos que remueven agua de la solución, como la destilación y la ósmosis inversa y aquellos que remueven la sal de la disolución como intercambio iónico (Tavani, 1971) y electrodiálisis (Ryche *et al.*, 1994). Otras clasificaciones prefieren el tipo de proceso de separación: filtración por membrana o separación por fase o bien, pueden clasificarse por la fuente de energía en mecánica, térmica o eléctrica, aunque los equipos usados implican mezclas de fuentes de energía y la investigación se inclina por la incorporación de fuentes de energía limpia y renovable.

2.3.1 Destilación

Como se mencionó en el apartado anterior, las primeras plantas desalinizadoras se desarrollaron en el campo de la destilación:

- Destilación de múltiple efecto (DME), consiste de varias celdas (efectos) consecutivas que se mantienen a un nivel decreciente de presión y temperatura. Cada efecto contiene un haz de tubos horizontales. La parte superior de la celda se rocía con agua de mar, la cual fluye por gravedad de tubo a tubo. La corriente de vapor se introduce dentro de los tubos, los cuales se enfrían por el rocío exterior de agua de mar, condensándose y produciendo agua destilada. El calor que se libera por la condensación eleva la temperatura del agua de mar fuera de los tubos, la cual en parte se evapora, incrementándose su concentración al fluir y produciendo salmuera en la parte inferior (*Fig. 2.6*).

El vapor producido fuera de los tubos no alcanza la temperatura de la corriente original, pero sirve como medio de calefacción para el siguiente efecto. En la última celda, se condensa el vapor producido en un intercambiador de calor convencional, que es enfriado por agua de mar. La salmuera y el agua destilada se obtienen de un efecto a otro hasta el último, desde donde se extraen por medio de bombas centrífugas. El vapor de calefacción del primer efecto es, generalmente, vapor de baja presión de condensación (30 kPa o 0.3 atm) o puede ser vapor producido por caldera.

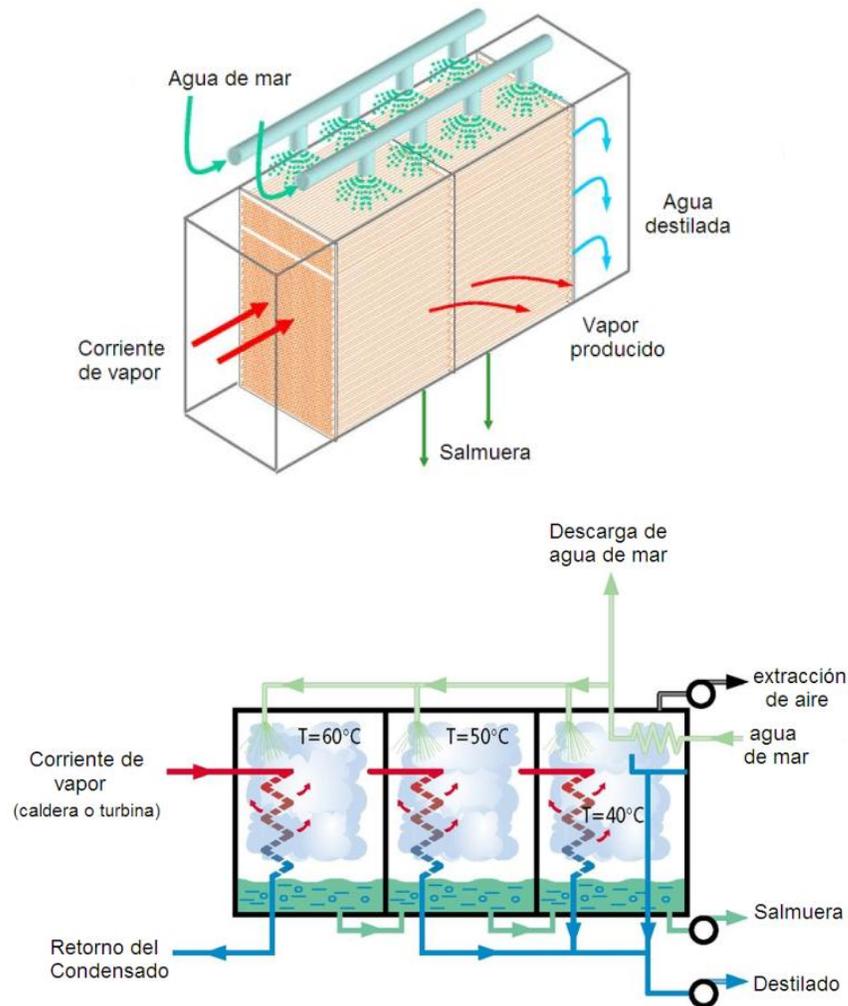
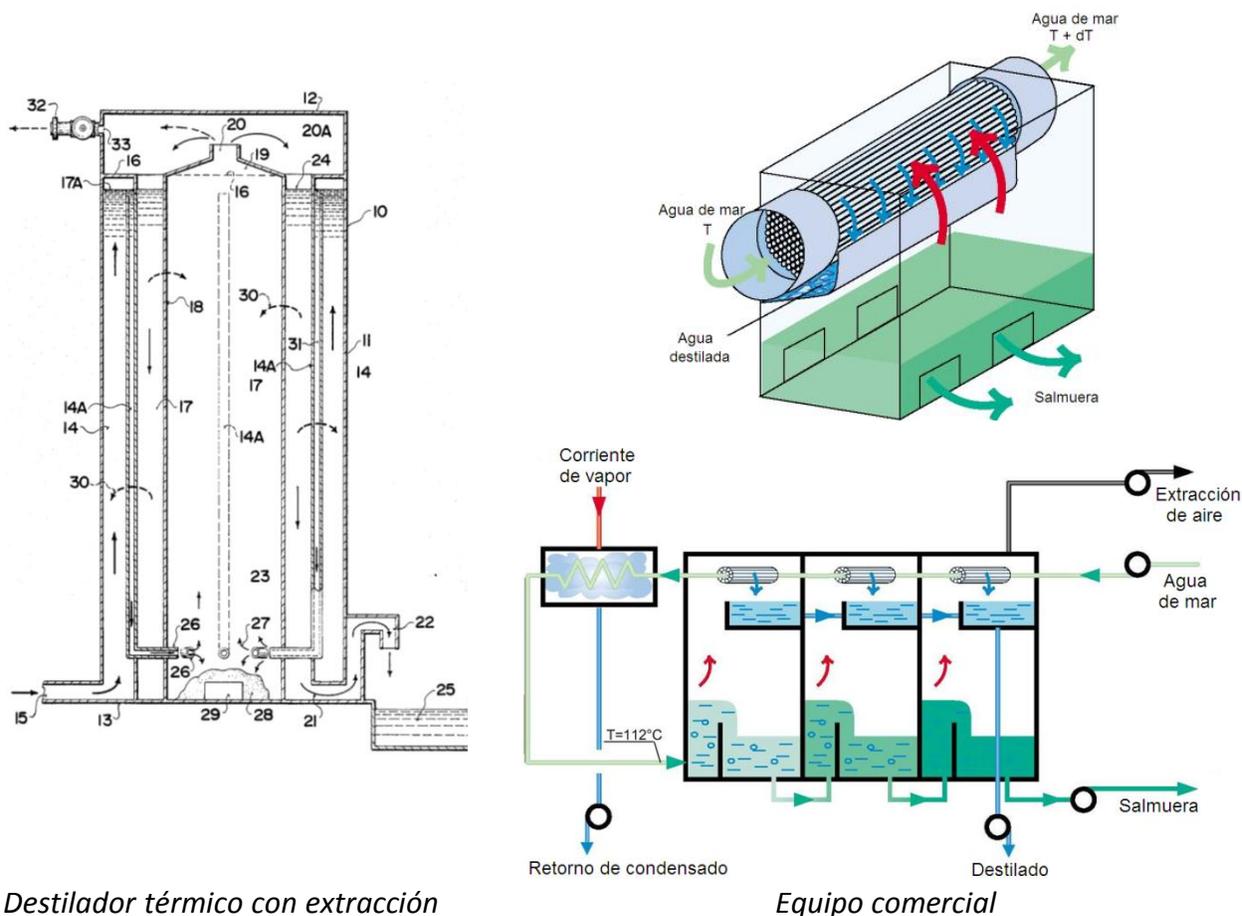


Fig. 2.6 Destilación de múltiple efecto (DME)
<http://www.sidem-desalination.com/en/process/MED/Process/>

- Destilación súbita en múltiple etapa (DSME), que aprovecha la liberación de energía almacenada en el agua cuando disminuye la presión, como en DME, pero en este caso sometidas a un vacío creciente. Los arreglos en serie, cada uno con menor presión, permite la producción de grandes cantidades de vapor que es re-condensado en tubos exteriores (Fig. 2.7).

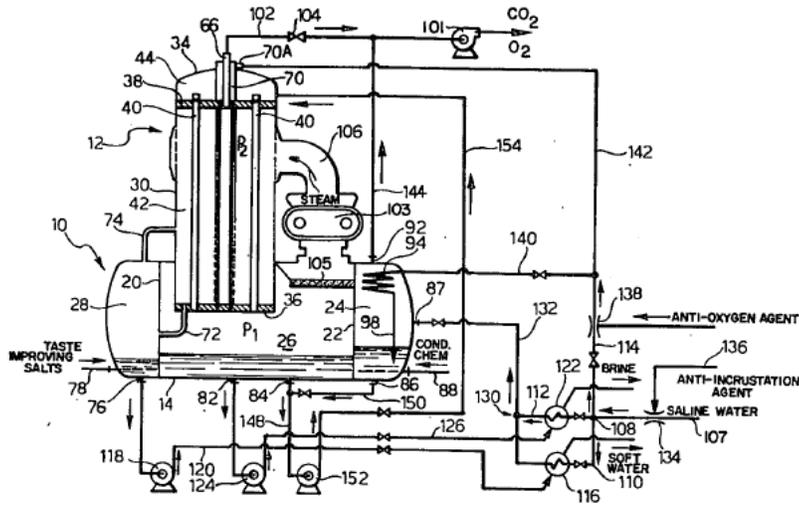
A su vez, el calor de condensación es utilizado para precalentar el agua salina del influente, reduciendo un poco el costo energético.



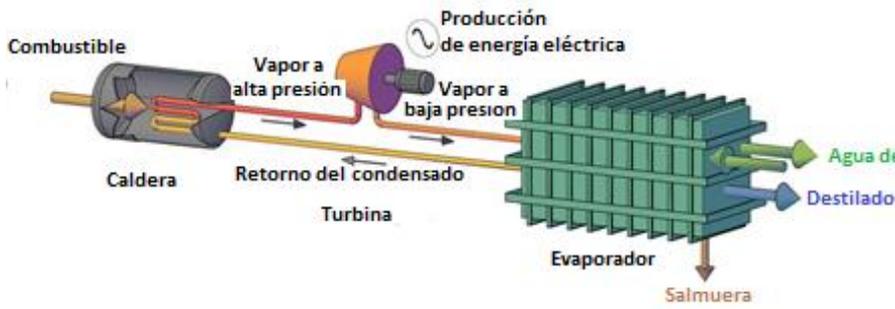
Destilador térmico con extracción de vacío, Atwell, George (1985) Patente US 4,536,257

Fig. 2.7 Destilación Súbita en Múltiple Etapa (DSME) <http://www.sidem-desalination.com/en/process/MSF/>

- Destilación por compresión de vapor (DCV), que emplea energía mecánica o térmica para comprimir el vapor de agua, se considera mecánica si usa un compresor mecánico y se considera térmica, si usa un eyector de vapor para comprimir el vapor del último efecto. El equipo comercial asocia una caldera de alta presión con una turbina de vapor para producir electricidad y proporcionar vapor a baja presión para la unidad de desalinización. El vapor suele estar alrededor de 300 kPa (3 bares), permitiendo que la unidad de destilación de efecto múltiple esté acoplada a un termocompresor para mejorar la eficiencia (Fig. 2.8)



Destilador por termo compresión de vapor
Barba et al., 1976
Patente US 3,997,408



Equipo comercial.
Co-generation
Steam-turbine
and desal plant
<http://www.side-m-desalination.com/en/process/Cogeneration/ST-and-DP/>

Fig. 2.8 Destilación por compresión de vapor (DCV)

- Destilación solar (DS), utiliza el calentamiento de la radiación solar para producir el vapor en un sistema tipo invernadero y aprovecha la superficie superior para la condensación y escurrimiento del agua destilada (Fig.2.9).

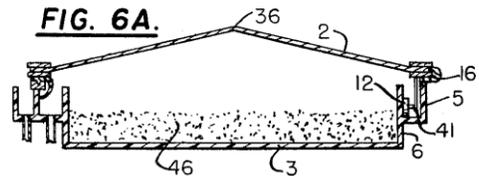
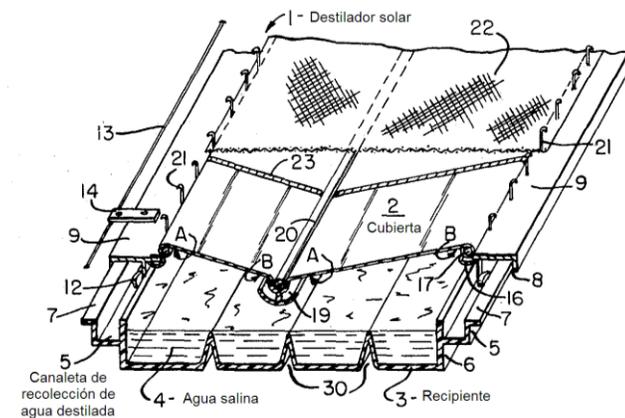
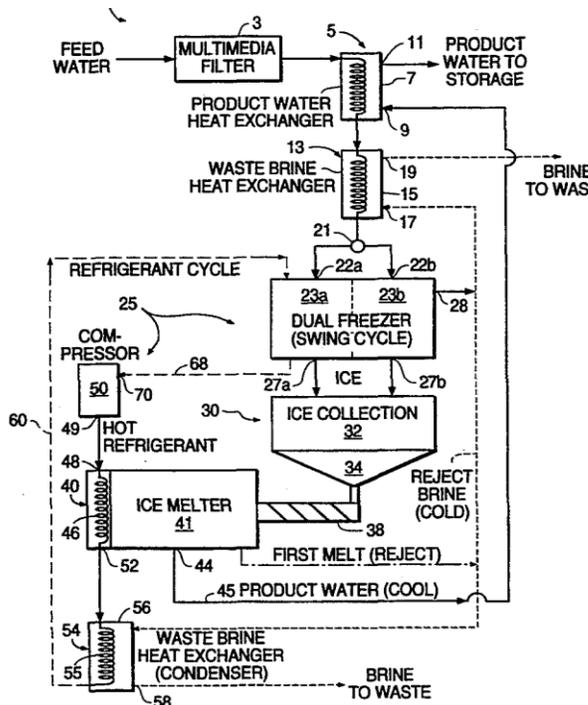


Fig. 2.9 Destilador Solar

Fuente: Hay, Harold (1977) US Patent No. 4,055,473

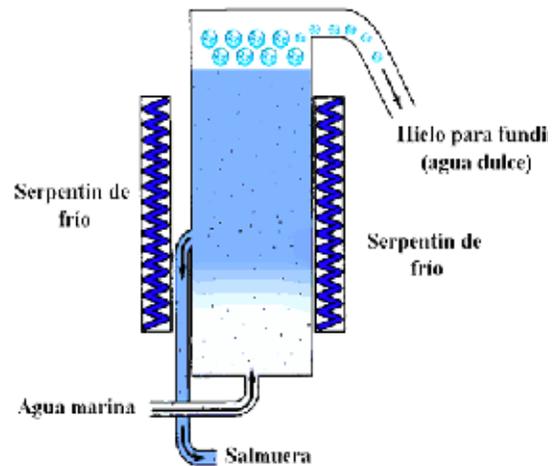
2.3.2 Congelamiento

Otros procesos térmicos implican retirar el calor en lugar de añadirlo, como es la producción de agua desalinizada por congelación (Fig. 2.10). Los requerimientos de energía son menores debido a que el calor de fusión del hielo, 6.01 kJ mol^{-1} , es mucho menor que el calor de vaporización del agua, $40.79 \text{ kJ mol}^{-1}$ (Chang, 1999). Sin embargo, el lento crecimiento de los cristales de hielo y la dificultad de eliminar los depósitos salinos no han facilitado el desarrollo exitoso de esta tecnología. Un ejemplo de desarrollo para superar las deficiencias mencionadas es el de Huseiney *et al.* (1995), que utiliza una malla de hielo con intercambiadores de calor que contienen las cavidades para incrementar el tamaño de los sólidos y utiliza rociadores para alimentar el hielo que se va formando, al tiempo que lava los contaminantes que quedan en la superficie.



Huseiney *et al.* (1995),
Patente US 5,400,619

Enfriamiento



Universidad Complutense de Madrid
<http://www.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua.html>

Fig. 2.10 Destilador por congelamiento del agua

2.3.3 Ósmosis Inversa

El desarrollo de los procesos de membrana inicia con el descubrimiento del fenómeno de la ósmosis, que es atribuido a diferentes autores, como comenta Eduardo Vega (2008), por un lado a Abbé Nollet en 1748 y por otro a Thomas Graham (1805-1869). Fue en el año 1959, en Sudáfrica, que se construyó la primera “Gran Planta” y con ello se impulsó la investigación y desarrollo de las tecnologías de membrana, en particular la ósmosis inversa.

El proceso de ósmosis inversa para desalinizar agua de mar o salobre, con el que se obtiene agua potable a partir del agua con sales, se produce al forzar a pasar el agua salina, bajo una alta presión, a través de una membrana semipermeable que filtra las sales y las impurezas. Estas sales e impurezas se expulsan del dispositivo de ósmosis inversa en forma de solución concentrada de salmuera en un flujo continuo que contiene una gran cantidad de energía de alta presión. La mayor parte de esta energía puede recuperarse con un dispositivo adecuado (Fig. 2.11).

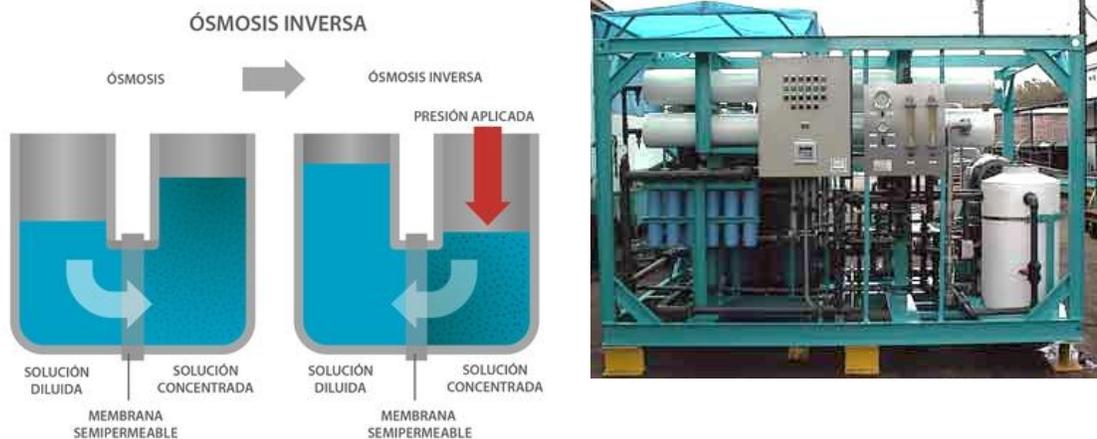
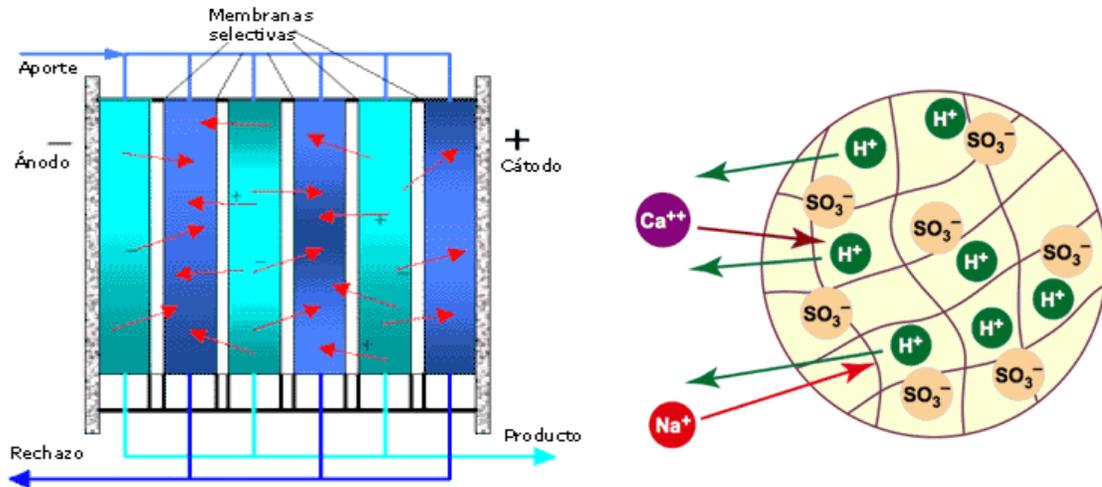


Fig. 2.11 Proceso de Ósmosis Inversa

2.3.4 Electrodialisis e Intercambio Iónico

Existen otros procesos que retiran las sales del agua aprovechando su carácter iónico, como son la electrodialisis y el intercambio iónico (Fig. 2.12). En el caso de la electrodialisis se utilizan membranas de intercambio iónico, forzando a los iones a pasar a través de la membrana y se separan así de la corriente principal, donde la fuerza conductora es la gran diferencia de potencial eléctrico formada entre los dos electrodos colocados en los lados externos del sistema.

En el intercambio iónico, los iones de las sales son retenidos en las resinas de intercambio, ocupando el lugar de H^+ y OH^- que son liberados a la corriente de agua, en un proceso químico de neutralización entre la fase sólida formada por las resinas y la fase líquida. Ambos procesos son muy usados para purificación del agua, pero se saturan muy rápidamente si se exponen a aguas salinas.



Proceso de Electrodiálisis

http://www.quimica.urv.es/~w3siiiq/DALUMNES/02/siiq9/index_archivos/electrodialisis.gif

Proceso de Intercambio Iónico

http://dardel.info/IX/images/bead_cation3.gif

Fig. 2.12 Desalinización por cargas iónicas

A pesar de la dificultad de no saturar el medio, los nuevos materiales han permitido avanzar la investigación en desalinización utilizando membranas de intercambio iónico. En Australia, Haibo Li, Linda Zou (2011), desarrollaron un sistema que coloca una membrana de intercambio catiónico delante del electrodo poroso que es el cátodo, mientras que una membrana de intercambio aniónico se coloca frente al ánodo, que también es formado de material poroso. Como resultado, los contra-iones pueden moverse libremente dentro y fuera de las membranas y electrodos porosos, mientras que el efecto de expulsión de los co-iones queda bloqueado, produciendo, idealmente, que por cada electrón transferido entre los electrodos una molécula de sal es removida de la disolución. La investigación ha sido positiva en aguas salobres y continúa esperando lograr economías comparativas con otros métodos, ya que la salmuera es un pequeño porcentaje (no especificado) de la solución de alimentación, cuando en otros métodos como ósmosis inversa llega al 90%.

2.3.5 Combinaciones de procesos de desalinización

Durante los últimos 20 años, varios inventores han intentado desarrollar dispositivos comerciales avanzados de recuperación de energía que permitieran resolver las limitaciones de rendimiento en todos los procesos mencionados para desalinizar agua de mar. Estos dispositivos empleaban combinaciones de pistones, palas, válvulas y temporizadores; algunos funcionaban bien inicialmente, pero presentaban muchos problemas de mantenimiento (Kamiya *et al.*, 2004; Klausner *et al.*, 2006). Otros estaban equipados con programas de inteligencia artificial, con lo que desaparecían rápidamente en un sector en el que el predominio de operarios no calificados exige sencillez (Nelson, 1972). Posteriormente comenzaron los trabajos de sustitución de fuentes de energía por fuentes no-convencionales.

Esta rama de investigación sobre sustitución de energía se manifiesta como la de mayor volumen de artículos y patentes de los últimos 10 años. Se han desarrollado colectores de energía solar para producción de energía eléctrica, aprovechando el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas. La energía aprovechable del viento para producir energía eléctrica ha motivado varias plantas de desalinización. Hasta el oleaje marítimo ha sido utilizado exitosamente para proveer energía usada en desalinización. Todavía ha resultado más costosa la instalación de sistemas con energía renovable que los convencionales, pero actualmente se compensa dicha diferencia, desarrollando sistemas que combinan ambas fuentes de energía, como el que se muestra en la Fig. 2.13 (Cipollina *et al.*, 2009).

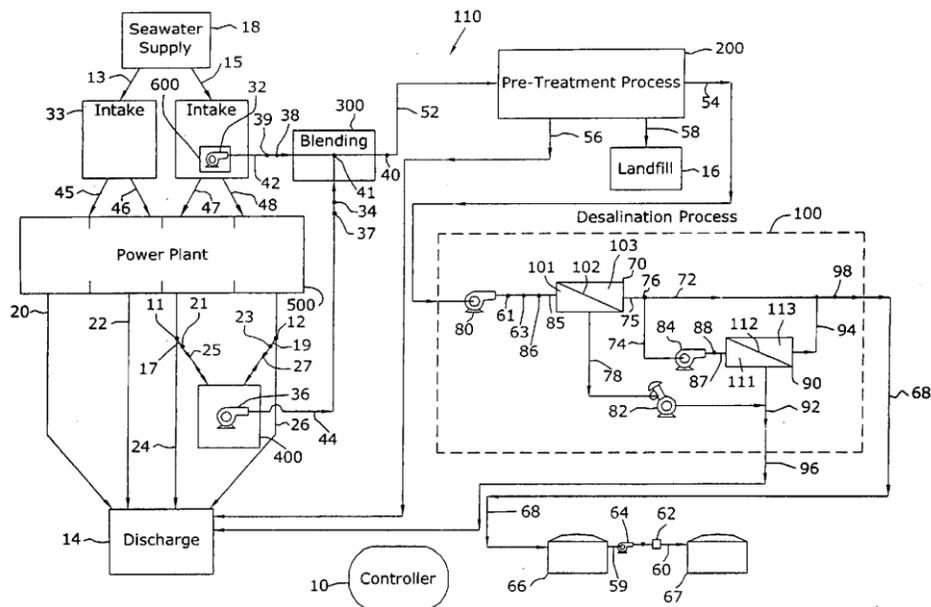


Fig. 2.13 Sistema de Ósmosis Inversa acoplada a Planta Termoeléctrica Voutchkov (2005) US 2005/0236309A

Se pueden mencionar sistemas de DME y DSME funcionando con energía solar, de las cuales se estableció una en México en 1978; se han combinado solar mecánica con ósmosis inversa en Francia, que produce $60 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, ósmosis inversa con batería solar; otras combinan la alimentación de energía eólica con electricidad, con diesel o con energía mecánica (Davies, 2011)

Existen trabajos como los de Shutla *et al.* (2011), que establecen que es posible desalinizar agua utilizando plantas y bacterias halofitas, que al reproducirse, consumen cantidades “importantes” de sal. Sin embargo, son modelos teóricos que necesitan validación experimental.

2.4 Manejo de salmueras

En general, los sistemas de desalinización de agua marina remueven sales disueltas, pero además, otros componentes que encuentran en el agua como materia orgánica y muchas veces microorganismos. Al separar un agua desalinizada, queda un residuo líquido denominado salmuera, muy concentrado en sales y la mayor parte de las veces, con sustancias utilizadas en la limpieza del sistema de desalinización, principalmente agentes desincrustantes que suelen tener un pH muy bajo, el cual debe tener una disposición final que no afecte el ambiente (Shulman *et al.*, 2011).

Los procesos convencionales para disponer de las salmueras son (OMS, 2010):

- Retorno al mar
- Descarga al alcantarillado o fuentes de agua
- Inyección en pozos profundos
- Evaporación en lagunas

Son evidentes los problemas asociados a la disposición simple de la salmuera en los dos primeros casos: incremento en salinidad local que afecte especies naturales o sistemas de tratamiento biológicos de aguas residuales, disminución de pH del sistema que afecte el equilibrio de las sustancias disueltas y sales precipitadas, así como el de los seres vivos. Ya se reportan en España especies en peligro de extinción por la disposición de salmueras en el Mediterráneo (Fernández-López *et al.*, 2009).

El caso de evaporación de las sales es uno de los sistemas que más investigación reciente produce. Fernández-López *et al.* (2009) presentan un proyecto de planta desalinizadora de descarga cero de salmuera, en la que se acoplan el destilador de múltiple efecto para producción de agua destilada con el destilador de compresión de vapor para evaporación de salmueras, elevando la temperatura hasta lograr la cristalización de las sales. Ambos equipos funcionando con energía solar y eólica en Almería, España.

Otro estudio es el de Zarzo-Martínez, Campos-Pozuelo (2011) quienes utilizan extracción con solventes orgánicos para recuperación de sulfatos y nitratos de cationes divalentes.

Los proyectos de lagunas solares se presenta en el apartado 3.1, como otras formas de aprovechamiento de la energía solar, aunque en particular en el estudio de Hajbi *et al.* (2010), se desarrolla el sistema para recuperación de iones mediante evaporación solar en lagunas y reuso de sales, en agricultura (como sulfato de calcio para acondicionar suelos alcalino y alcalino-sódicos) y en la industria.

De las aportaciones recientes más interesantes está el trabajo de Melián-Martel *et al.* (2011), quienes proponen el aprovechamiento de las salmueras para producción de ácido clorhídrico (HCl), cloro gas (Cl_2) e hidróxido de sodio (NaOH), lo cual requiere un importante consumo de energía, pero que puede captarse de fuentes de energía renovables y proporciona productos de mayor valor y siempre demandados tanto a nivel industrial como municipal.

3. ASPECTOS PRIMORDIALES DE LA DESTILACIÓN SOLAR

En este capítulo se explican las partes y el funcionamiento de un destilador solar, con énfasis a los múltiples trabajos en torno al mejoramiento del diseño de destiladores solares y a los modelos matemáticos que explican y simulan su funcionamiento. No se dejó de lado una breve descripción de otras aportaciones de usos de la energía solar en destiladores.

El destilador solar es un dispositivo simple que toma calor de la insolación para evaporar agua y luego regresa ese calor al ambiente al enfriarse el vapor y condensarse en las cubiertas transparentes. Chargoy y Fernández Zayas (2010), en su libro “Destilación solar de agua de mar en México 1983 a 2003” lo establecen como “*el calor que se recibe del sol en el agua por destilar es igual al que se entrega por las cubiertas al aire*” en una concepción simple de la Primera Ley de la Termodinámica, en las condiciones de estado permanente que se emplea en las simulaciones matemáticas. Así, la capacidad de intercambio por evaporación–condensación entre el agua por destilar y el interior de las cubiertas, está determinada por el producto del coeficiente térmico respectivo y la diferencia de temperaturas entre el agua y la cubierta o techo por el interior.

En general, las instalaciones diseñadas para la destilación solar consisten en una caseta de techo transparente o translúcido que tiene como propósito recibir la luz solar, este techo se inclina (ya sea de un lado o en forma de V invertida) y recibe el vapor condensado en una canaleta en el lado inferior del techo inclinado y un recipiente somero con agua salina expuesta a la radiación solar de donde se evaporará el agua (Fig. 3.1). Además, cada inventor propondrá modificaciones que incrementen la producción de agua evaporada por metro cuadrado de superficie de terreno (Andersen, 2001).

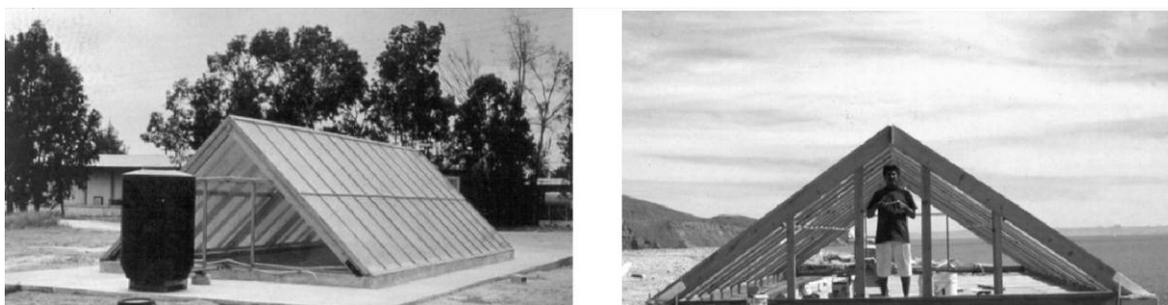


Fig. 3.1 Prototipo de Destilador Solar

Fuente: J.L. Fernández Zayas and N. Chargoy del Valle
Destilación Solar de Agua de Mar en México. 1983–2003

La destilación solar es el sistema de desalinización de agua de mar de menor costo energético, que aprovecha la energía limpia y renovable del sol, pero es el sistema que mayor área superficial ocupa, ya sea para el depósito del agua salina, como para los

colectores solares, con un rendimiento muy pequeño aunque hay que reconocer que, debido a la lentitud del proceso, se evapora agua con mejor calidad que cualquiera de los otros sistemas de desalinización de agua de mar, ya que remueve sales, microorganismos y otros sólidos disueltos o suspendidos, con excepción de los compuestos volátiles. Sin embargo, está lejos de competir con otros sistemas de desalinización, su utilidad principal radica en las condiciones de carencia de energía eléctrica o de combustible para producirla (Kabeel, El-Agouz, 2011). Y son muchas las comunidades pequeñas, aisladas, con escasez de agua potable y con disponibilidad de agua salobre o salina que se verían beneficiadas cubriendo sus propias necesidades. Además, debería llegar ser un método de apoyo a los sistemas de atención a emergencias durante desastres (inundaciones, terremotos, naufragios), cuando el primer suministro requerido es el agua potable.

Este concepto básico del destilador solar proporciona, al menos, un rendimiento general de $1 \text{ kg m}^{-2}\text{d}^{-1}$ de agua dulce, llegando a producir en condiciones óptimas de $5\text{-}9 \text{ kg m}^{-2}\text{d}^{-1}$. Considerando que una persona consume al día al menos 2 litros de agua (2 kg), se requieren al menos 2 m^2 por persona para garantizar su abasto mínimo, pero sus necesidades completas llegan a ser de $100 \text{ litros hab.}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (conforme el estudio que la CNA en 1994, desarrolló a través del IMTA, 1993, donde se presenta los valores de consumo doméstico por clima y el mínimo para el clima más benigno es precisamente de $100 \text{ L hab.}^{-1} \text{ día}^{-1}$), lo que limita severamente el proceso por el área de terreno requerida, generalmente ya ocupada en otros usos: vivienda, cultivos, industria, etc.

Los diferentes procedimientos para incrementar la eficiencia de los destiladores solares se remiten, en general, a los parámetros de diseño que, como mencionan Tiwari, Dimri y Chel (2009) son:

- Profundidad del agua;
- Espesor de la cubierta de vidrio;
- Material de cubierta para condensación;
- Número y tipo de colector solar (espejos o parábolas adicionales al techo);
- Temperatura ambiente;
- Intensidad de radiación solar;
- Velocidad del viento.

Las recomendaciones de diseño, que Tiwari *et al.* (2009) exponen, así como las investigaciones que reportan Kabeel, El-Agouz (2011) se ven reflejadas en varias de las patentes consultadas y en resumen son:

- a) El coeficiente de transferencia de calor es directamente proporcional con la temperatura ambiente.
- b) El ángulo de inclinación de la cubierta en un destilador solar simple, favorece la transmitancia de los rayos del sol cuando usa el mismo ángulo que la latitud de la localidad donde se encuentra, porque los rayos del sol penetrarán muy cerca de la

normal durante el año (Singw *et al.*, 1995). Sin embargo, varios autores prefieren un ángulo mayor con motivos estructurales y de escurrimiento del condensado, evitando que las gotas regresen al depósito de agua salina (Rubio *et al.*, 2004; Kabeel, El-Agouz, 2011).

- c) Al aumentar la masa de agua salina por metro cuadrado (es decir, la profundidad del recipiente) por encima de 0.15 m, el rendimiento disminuye. Los mejores resultados fueron encontrados con profundidades de 0.02 m, hasta en 32% superior a la producción de agua cuando la profundidad en el recipiente de agua fue de 0.15 m.
- d) Al aumentar el espesor del material transparente del techo, el rendimiento disminuye, experimentalmente se demostró que una cubierta de vidrio de 3 mm de espesor tenía una producción mayor en un 16.5% que una cubierta del mismo material de 6 mm de espesor.
- e) Al aumentar el espesor del material de aislamiento, por encima de 0.1 m, el rendimiento disminuye.
- f) Al aumentar el número de colectores solares, el rendimiento aumenta. Se han probado colectores solares montados sobre un eje para tener varios ángulos de recepción de rayos solares a lo largo del día, así como sistemas de colectores, casi siempre con forma de parabólicas, montados en un sistema móvil que permitiera girar siguiendo al sol. También se han utilizado sistemas de calentamiento solar de agua externos al destilador (ver Fig. 3.2) para incrementar la temperatura del agua salina, llegando a temperaturas entre 70 y 90°C, lo que han definido como *destiladores solares activos*, en contraposición con los *destiladores solares pasivos*, que no precalientan el agua salina.

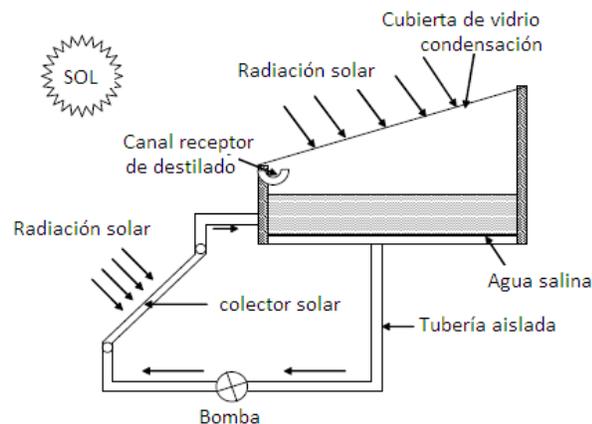


Fig. 3.2 Esquema de un destilador solar activo integrado a un colector solar
Fuente: Tiwari, Dimri, Chel (2009)

Otra forma de incrementar la insolación fue la instalación de espejos en diferentes posiciones y con ángulos que reflejaran los rayos solares. En los trabajos de Tanaka (2011a, 2011b) se calcula teóricamente y mide experimentalmente el efecto de diferentes inclinaciones de los reflectores, considerando las estaciones primavera, verano, otoño e invierno, encontrando que el incremento en la producción de agua destilada llega al 25% en el solsticio de verano y sólo al 10% en el solsticio de invierno (Fig. 3.3).

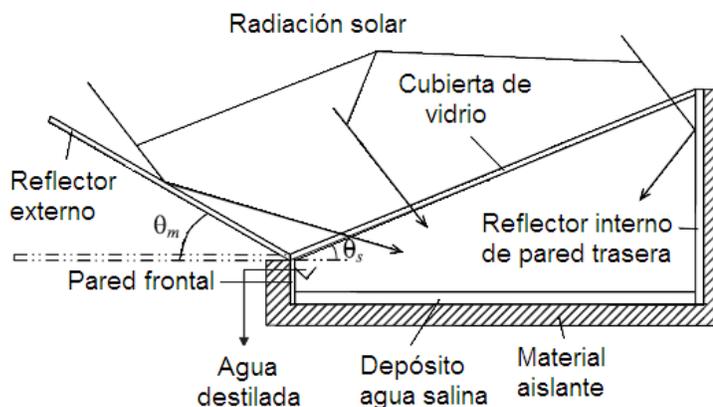


Fig. 3.3 Destilador solar con reflector externo
Fuente: Tanaka, 2011b

- g) El rendimiento también se incrementa a menores valores de capacidad calorífica del material del condensador, a saber, es mayor el rendimiento con el cobre que con el vidrio y éste a su vez, que con el PVC. Hasta los trabajos de Tiwari, los costos han favorecido la selección del vidrio, aunque Kabeel, El-Agouz (2011) proponen los plásticos como polietileno para destiladores de tiempo de vida corto (ya María Tesles, en 1968, había patentado destiladores solares individuales de plástico en apoyo de los militares estadounidenses perdidos en el mar, principalmente pilotos aéreos de la Segunda Guerra Mundial, como se mostró en la Fig. 2.3).
- h) Al aumentar la velocidad del viento, aumenta la velocidad de evaporación debido a que el calor de transferencia desde el vidrio al aire ambiente aumenta, enfriando el vidrio y favoreciendo la condensación, por lo que el rendimiento aumenta.
- i) La velocidad de condensación puede aumentarse haciendo pasar una película de agua salina por el exterior del techo, lo cual enfría el techo y permite que se incremente el diferencial de temperaturas entre el agua del recipiente y el techo, favoreciendo el proceso de evaporación y condensación sin gran pérdida de la radiación solar que ingresa. El mismo proceso se aprovecha para precalentar el agua que ingresa al recipiente de evaporación.

- k) Marmouch *et al.* (2009) plantean los problemas en la condensación del vapor de agua en los diferentes sistemas de destilación solar, por lo que proponen acoplar una torre de enfriamiento al destilador solar (Fig. 3.4).

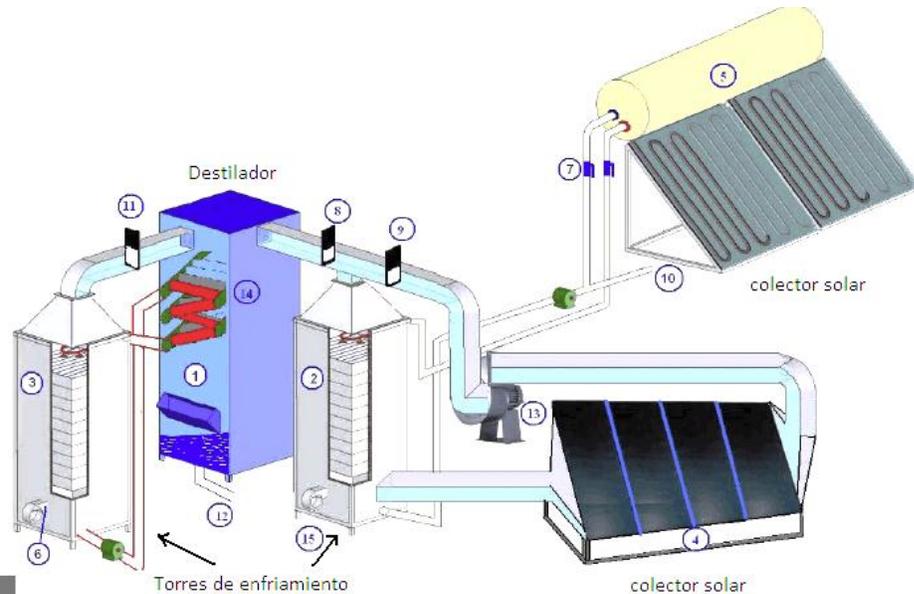


Fig. 3.4 Esquema de un destilador solar integrado a torres de enfriamiento
Fuente: Marmouch, Hichem; Orfi, Jamel; Ben Nasrallah, Sassi (2009)

Por otra parte Kabeel, El-Agouz (2011) reportan que Rahim en 1995, diseñó un compartimiento anexo al destilador que recibiera el vapor conforme se fuera formando y lo condensara, a una temperatura considerablemente inferior ($<20^{\circ}\text{C}$) que el interior del destilador (60°C), con lo que se incrementó la eficiencia de producción de destilado en un 70%. Todas las formas de condensador externo reportadas incrementan la producción, pero ninguna realiza un análisis de costo por los equipos y área adicionales para la condensación.

Lindblom, Nordell (2007) también propusieron condensación externa al destilador solar, pensando principalmente en riego de cultivos con agua salina o salobre, pero que también se aplicaba a potabilización de agua, llamando al sistema “condensación bajo-suelo de aire húmedo” en una destilación solar que se ilustra en la Fig. 3.5.

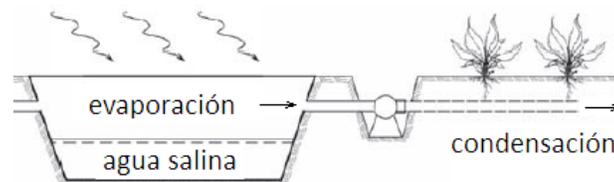


Fig. 3.5 Condensación bajo suelo de aire húmedo por evaporación solar de agua salina

Farsad, Behzadmehr, (2011) proponen el método de humidificación-dehumidificación (Fig. 3.6), consistente en la saturación del aire con vapor de agua, con colectores solares independientes para aire y para el agua salobre, encontrando que la producción podía llegar hasta 5 kg h^{-1} .

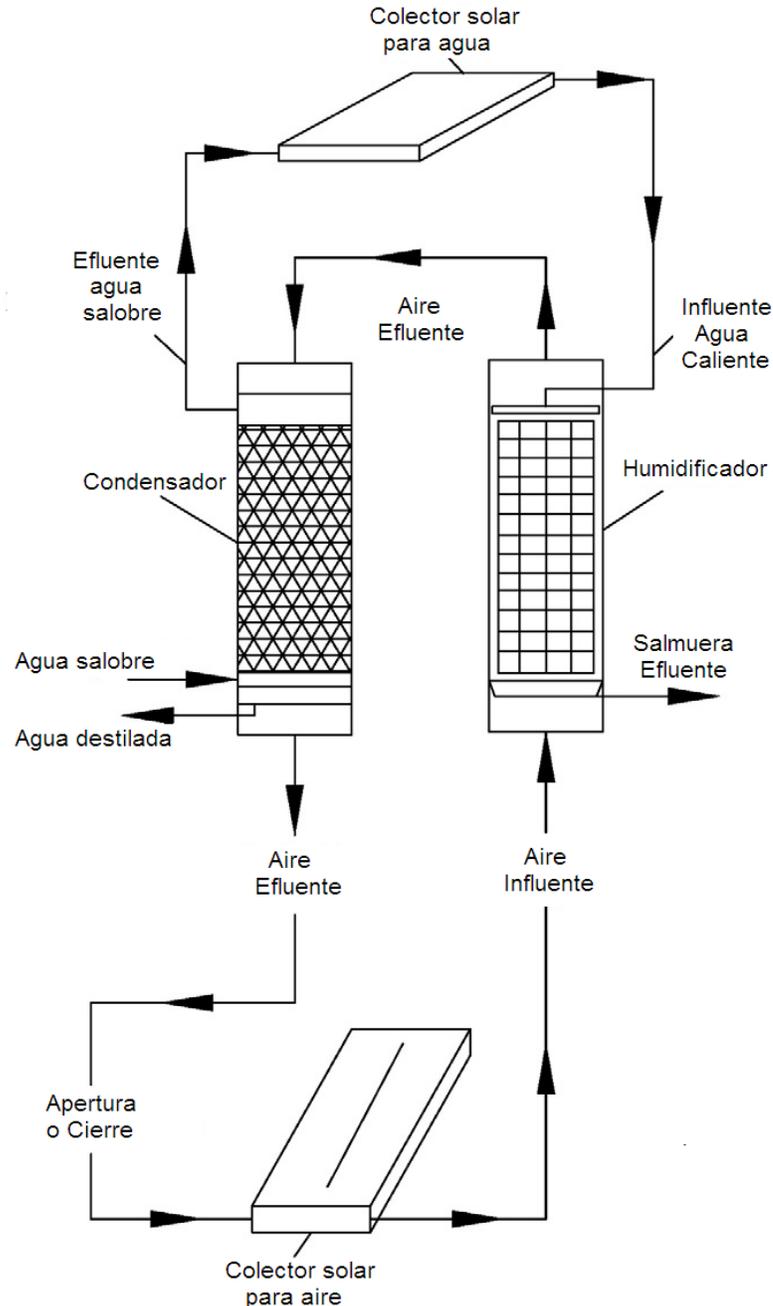


Fig. 3.6 Destilador solar con sistema humidificación-dehumidificación

Este mismo proceso fue probado por Yuan *et al.* (2011), produciendo 1000 L día^{-1} en 100 m^2 de terreno.

- j) Entre los materiales utilizados en el recipiente de agua salina, con el propósito de absorber calor e incrementar el rendimiento, en valores del 25 al 65%, se menciona en el trabajo de Salah Abdallah *et al.* (2009) el uso de carbón mineral y vegetal por Okeke *et al.* (1990) y por Naimi, Abdelkaewi (2002), de sales disueltas como CuSO_4 , KMnO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, CoCl_2 por Jamal (1991), recubrimientos del recipiente con pinturas y uso de hules negros por Akash *et al.* (1998), Nafey *et al.* (2001), Naim y Abdelkaw (2002), inclusive Abu-Hijleh, Rababah (2003) llenó el recipiente con cubos metálicos negros, con buenos resultados hasta que comenzó la corrosión.

3.1 Otras formas de aprovechamiento de la energía solar en sistemas de desalinización del agua

Gnaneswar, Nirmalakhandan (2008) proponen utilizar el calor no aprovechado de los sistemas de enfriamiento como refrigeración y aire acondicionado para incrementar la temperatura del agua salina y lograr una mayor eficiencia en la destilación solar.

Se han desarrollado trabajos para almacenar energía térmica a partir de energía solar (Fig. 3.7), en sistemas con cambio de fase, principalmente de sólida a líquida entre las temperaturas de 15 y 45°C, como el cloruro de calcio ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), sulfito de sodio $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Benli, 2009)

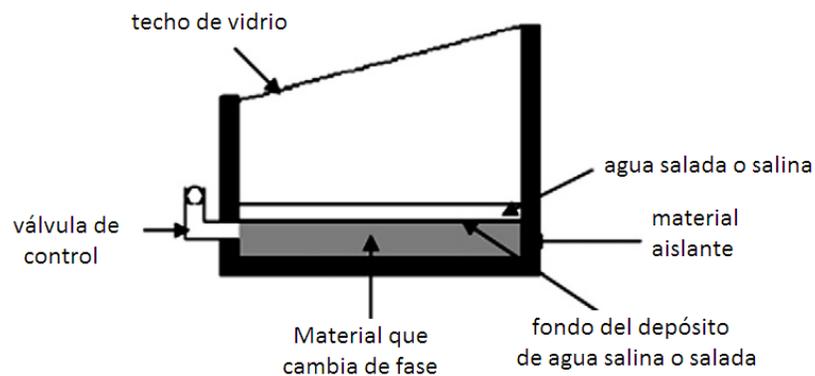


Fig. 3.7 Diagrama esquemático del destilador solar con sulfito de sodio, como material que cambia de fase (Benli, 2009)

Cabe mencionar que las lagunas de evaporación de salmueras forman parte del aprovechamiento de energía solar en los procesos de desalinización. En ellas, los estudios son tendientes a reducir la turbiedad para mejorar la eficiencia de transmisión de energía solar en lagunas de evaporación al concentrar sales provenientes de las salmueras de procesos de desalinización del agua, correlacionan la turbiedad del agua con la transmisividad de la radiación solar y demuestran que el hipoclorito de sodio es un buen agente clarificador del agua salina concentrada, pero su efecto se reduce a las primeras 50 horas, después de las cuales se reinicia el crecimiento de algas y bacterias que proporcionan turbiedad al agua, a diferencia de coagulantes como el sulfato de aluminio y el $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ (Li *et al.*, 2010).

Leblanc *et al.* (2011) presentan las experiencias de lagunas solares en El Paso, Texas, EUA y en Victoria, Australia. Les llaman lagunas solares con gradiente de salinidad, formado en capas horizontales con un espesor global de 2 a 5 m (Fig. 3.8). La radiación solar atrapada en el fondo negro, se atrapa en la región más baja, denominada la zona convectiva inferior, almacenadora de calor. La capa intermedia es una zona no-convectiva donde se forma un gradiente de salinidad, siendo la parte superior menos salina que la inferior. La zona superior convectiva es la capa superficial, a la que se le suministra agua fresca para compensar la pérdida por evaporación. La pérdida de salinidad en las capas inferiores se compensa agregando salmuera.

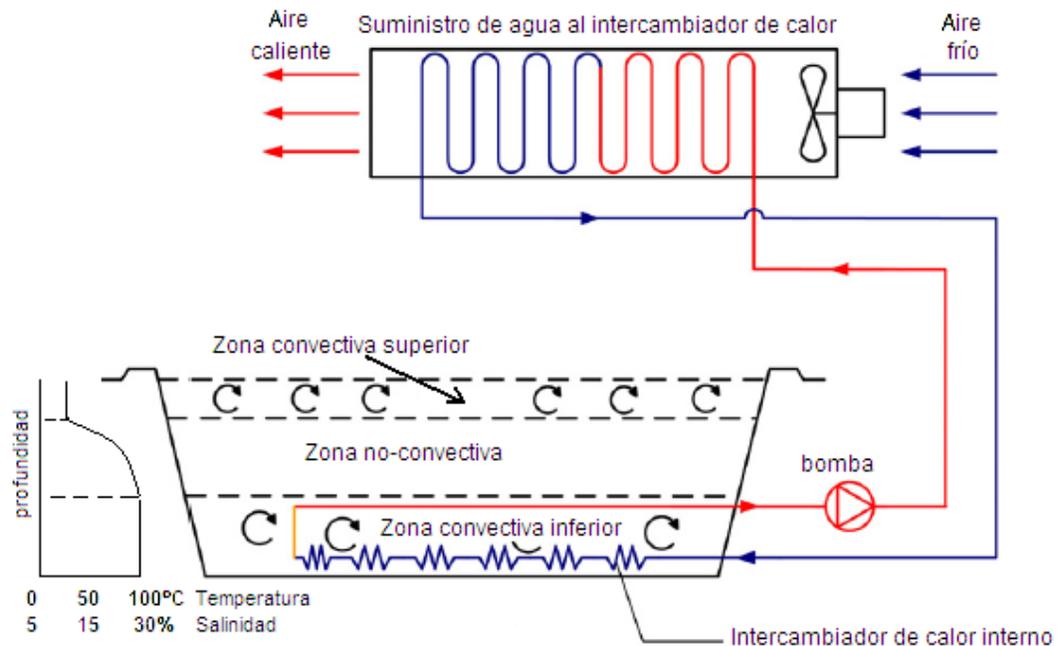


Fig. 3.8 Laguna solar con gradiente de salinidad

El calor puede tener usos industriales o ser reciclado en el mismo sistema de desalinización, siendo una forma muy eficiente de recuperar cristales de cloruro de sodio, lo que lograron agregando ácido clorhídrico (HCl) cerca de la interface entre la zona no-convectiva y la zona convectiva inferior.

Kalogirou (2005) coloca como ejemplos de sistemas que acoplan un estanque solar a un proceso de destilación súbita en múltiple etapa (DSME):

- Margarita de Savoya, Italia: capacidad de la planta 50 a 60 m³d⁻¹
- Islas Cabo Verde: Atlantis "Flash automático", planta capacidad de 300 m³d⁻¹
- Túnez: un pequeño prototipo en el Laboratorio de Thermique Industrielle, un estanque solar de 1500 m² impulsa un sistema DSME de 0.2 m³d⁻¹
- El Paso, Texas: capacidad de la planta 19 m³d⁻¹. En este caso también se acopla con un sistema de ósmosis inversa.

También menciona que hay sistemas que acoplan las lagunas solares a plantas de destilación de múltiple efecto (DME):

- Universidad de Ancona, Italia: una planta híbrida con capacidad de 30 m³d⁻¹
- cerca del Mar Muerto: la capacidad de planta de 3.000 m³d⁻¹.

Zuo *et al.* (2011) proponen el aprovechamiento de la energía solar captada en un destilador solar utilizando chimeneas solares, en un sistema integrado que incluye: la chimenea, el colector solar, una turbina, material que absorbe energía y el destilador solar, como se muestra en la Fig. 3.9.

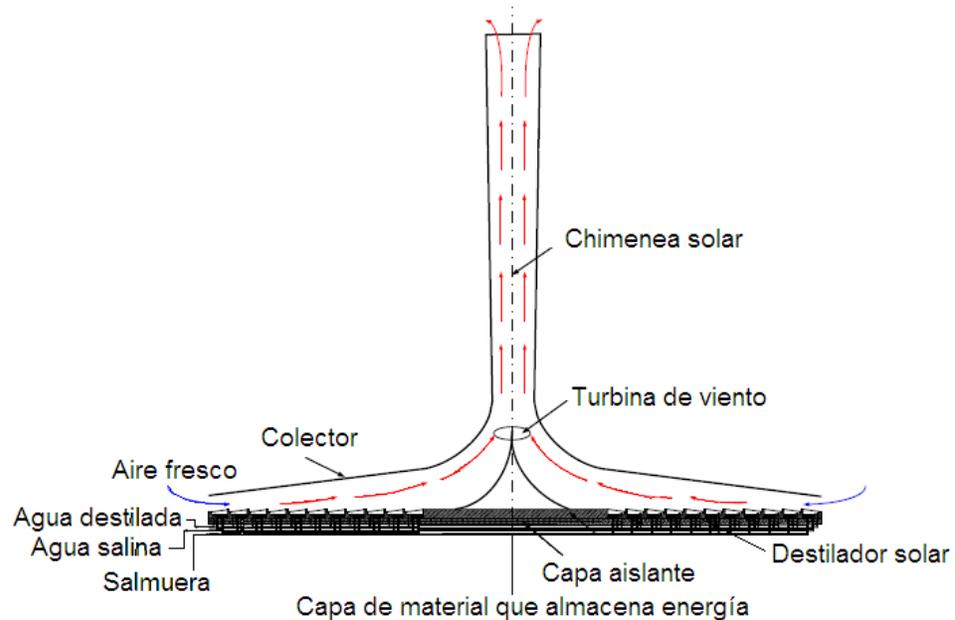


Fig. 3.9 Aprovechamiento de energía de un destilador solar en chimenea

Antwi *et al.* (2011) utilizaron destiladores solares, no para desalinización de agua salina o salobre, sino para remoción de fluoruros en una población pobre de Ghana. La concentración de sólidos disueltos en su agua subterránea, que es la fuente de abastecimiento de agua con que cuentan, no tiene altos valores de sólidos disueltos, las cuales se encuentran en promedio de 138 mg L^{-1} , pero la concentración de fluoruros, que rebasa los 20 mg L^{-1} , produce fuertes problemas dentales en la población, especialmente en la infantil, por fluorosis, dado que la recomendación de la Organización Mundial de la Salud está en 0.5 mg L^{-1} como mínimo y en 1.5 mg L^{-1} como máximo (ONU, 2010). Los resultados fueron muy satisfactorios, con un promedio de 0.76 mg L^{-1} en el efluente a costos que permitían a cada hogar, destilar su agua para consumo como bebidas y preparación de alimentos (*Fig. 3.10*).



Fig. 3.10 Destiladores Solares para remoción de fluoruros en comunidades rurales de Ghana.

3.2 Modelos de transporte de calor y masa en destiladores solares

Se reconoce a Dunkle, en 1961, como el primero en publicar una teoría fundamental para predecir el transporte de calor y masa en un destilador solar cerrado para un típico intervalo de temperaturas que alcanza a superar los 50°C. De acuerdo con las relaciones propuestas por Dunkle, el coeficiente de transferencia de calor convectivo para un medio en el que se tiene transferencia simultánea de calor y masa se puede expresar como función de una diferencia de temperaturas modificada. A continuación se presenta la ecuación de Dunkle para calcular la transferencia de calor convectivo, h_{cv} (Chargoy, Fernández Zayas, 2010; Tsilingiris, 2010; Chaibi, 2000; García Marí, 2007):

$$h_{cv} = 0.884 \left[T_s - T_g + \frac{(P_{vs} - P_{vg})(T_w + 273)}{268.9 \times 10^3 - P_{vs}} \right]^{1/3} \quad (\text{Ec. 1})$$

Considerando la correlación de Malik (Kumar, Tiwari, 2009; Tsilingiris, 2010), para diferencias de temperatura bajas (del orden de 10°C), es posible obtener el coeficiente de transferencia de masa (h_m):

$$\frac{h_m}{h_{cv}} = 0.013 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

h_{cv}	coeficiente de transferencia de calor convectivo, [W m ⁻² K ⁻¹]
T_s	Temperatura absoluta de la interface líquida [K]
T_g	Temperatura absoluta de la superficie de condensación [K]
P_{vs}	Presión de vapor de agua en la superficie líquida [Pa]
P_{vg}	Presión de vapor de agua en la superficie de condensación [Pa]
T_w	Temperatura absoluta del destilado [K]
h_m	coeficiente de transferencia de masa [m s ⁻¹]

Chaibi (2000) quien efectúa un análisis de la energía solar que ingresa a un destilador solar integrado en el techo de un invernadero, reportó haber usado la ecuación de Nayak, para calcular la presión parcial del vapor saturado (P) a presión atmosférica como función de la temperatura, en el intervalo de funcionamiento de destiladores solares pasivos (25-60°C). Así se establece en la ecuación 3, la presión parcial del vapor saturado [Pa] como una función de la temperatura [K].

$$P = 293.3T - 84,026.4 \quad (\text{Ec. 3})$$

A temperaturas próximas a los 50°C, la presión de vapor parcial en la salmuera y la temperatura del cristal son pequeñas en comparación con la presión barométrica total y bajo la consideración de que a estas temperaturas las propiedades termofísicas de la mezcla de vapor saturado no difieren sustancialmente de las propiedades del aire seco. Aunque Tsilingiris (2010) ha desarrollado diversos trabajos procurando agregar variables de la teoría molecular, siempre encuentra que el fenómeno es fuertemente dependiente de la Temperatura y que dichos modelos son válidos a las temperaturas de destiladores pasivos, sin embargo, son modelos que comienzan a fallar en el cálculo del transporte de masa a temperaturas mayores de 60°C y que tienen diferencias significativas a temperaturas de 80-92°C, reportadas en diferentes artículos por investigadores como Adhikari *et al.* (1990) con un amplio intervalo de temperaturas (19-84°C), la mayor parte mayores a 60°C y diferencias de temperatura de 12 a 30°C, con una máxima temperatura de salmuera de 92°C, Aggrawal and Tiwari (1998) con temperaturas entre 23 and 75°C, Zheng *et al.* (2002), reporta 37–80°C con una máxima temperatura de salmuera de 85.5°C.

Para mejorar la predicción de transferencia de calor y masa, Tsilingiris (2010) propone utilizar el modelo de Chilton-Colborn desarrollado en 1934 en el que calcula coeficientes de transferencia de masa con base en datos de transferencia de calor y fricción en fluidos, modificado con cálculos basados en las mezclas de temperatura en el vapor saturado y son dependientes de las propiedades termofísicas.

Esta ecuación de Tsilingiris (2010) establece que:

$$\frac{h_m}{h_{cv}} = \frac{h_{fg}}{(\rho c_p)_{av}} \left(\frac{P_o}{P_{LM}} \right) \frac{M_w}{\mathcal{R}} \frac{\frac{P_{vs}}{T_s} - \frac{P_{vg}}{T_g}}{P_{vs} - P_{vg}} Le^{-2/3} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

h_m	coeficiente de transferencia de masa [m s^{-1}]
h_{cv}	coeficiente de transferencia de calor convectivo, [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]
h_{fg}	calor de evaporación [kJ kg^{-1}]
ρ	densidad [kg m^{-3}]
c_p	capacidad de calor específico [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
av	promedio
P_o	Presión total [Pa]
P_{LM}	Promedio logarítmico de la Presión [Pa]*
P_{vs}	Presión de vapor de agua en la superficie líquida [Pa]
P_{vg}	Presión de vapor de agua en la superficie de condensación [Pa]

M_w Masa molar [kg kmol⁻¹]
 \mathcal{R} Constante universal de los gases, $\mathcal{R} = 8.314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 T_s Temperatura absoluta de la interface líquida [K]
 T_g Temperatura absoluta de la superficie de condensación [K]
 T_w Temperatura absoluta del destilado [K]
 Le Número de Lewis, adimensional (-),
 $* P_{LM} = \frac{(P_o - P_w) - (P_o - P_g)}{\ln \frac{P_o - P_w}{P_o - P_g}}$

(Ec. 5)

El número de Lewis es función del coeficiente de difusión (D) y de la difusividad térmica del aire húmedo. Así

$$Le = \frac{\alpha(\bar{T}, RH)}{D(\bar{T})} \quad (\text{Ec. 6})$$

La aplicación del modelo basado en Dunkle o en Chilton-Colborn dependerá del intervalo de temperaturas que se alcancen con los materiales utilizados, ya que los destiladores solares pasivos funcionan muy bien con el modelo de Dunkle, como lo demuestra Tsilingiris (2011) y se observa mejor correlación en los destiladores solares activos al aplicar el modelo de Chilton-Colborn.

El modelo que presentan Kumar, Tiwari (2009), también se refieren a la necesidad de proyectar valores cuando se implementan dispositivos capaces de aumentar la temperatura a valores mayores de los 50°C modelados correctamente por Dunkle en 1961, pero limitados cuando se usan concentradores solares u otros métodos para aumentar la temperatura del agua cruda, como en los destiladores solares activos.

Son muchos los trabajos de los años recientes que procuran mejorar los modelos de producción de agua dulce a partir de destiladores solares, que han trabajado en diferentes aspectos del diseño y en especificar mejor los balances de energía. Por ejemplo, Feilizadeh *et al.* (2010) desarrollaron un modelo para un destilador solar de una pendiente simple, que trata de cuantificar la cantidad de energía solar que entra al sistema tomando en cuenta la influencia de las paredes laterales del destilador, dividiendo la radiación recibida en directa (*beam*) y difusa (*diffuse*).

$$Q_{c,w-g} = 0.884 \times A_b \times \left[T_w - T_g + \left(\frac{P_w - P_g}{268900 - P_w} \right) T_w \right]^{\frac{1}{3}} (T_w - T_g) \quad (\text{Ec. 7})$$

$$m = \frac{16.276 \times 10^{-3} \times Q_{c,w-g}}{h_{fg}} \times \left(\frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \right) \quad (\text{Ec. 8})$$

donde:

$Q_{c,w-g}$:	Tasa de transferencia de calor convectivo entre el agua y el techo de vidrio, [W]
A_b	Área del depósito de agua salina, [m ²]
T_w	Temperatura del agua, [K]
T_g	Temperatura del techo de vidrio, [K]
P_w	Presión parcial de vapor a la temperatura del agua, [Pa]
P_g	Presión parcial de vapor a la temperatura del techo de vidrio, [Pa]
m	tasa de producción de agua destilada, [kg s ⁻¹]
h_{fg}	Calor latente de vaporización del agua, [J kg ⁻¹]

En la Fig. 3.11, se muestran dos de los modelos con sus sombras, de las diferentes formas que encontraron Feilizadeh *et al.* (2010) y una fotografía de sus modelos experimentales.

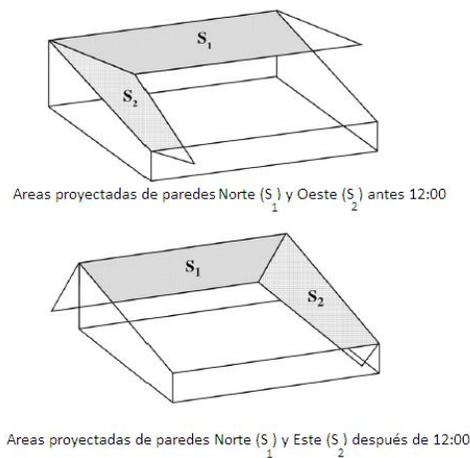


Fig. 3.11 Destilador solar pasivo con medición de proyección de sombras
Fuente: Feilizadeh et al. (2010)

4. APLICACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN A LA DESTILACIÓN SOLAR

En este capítulo se revisa el proceso de transpiración vegetal y la aplicación de la evapotranspiración en invernaderos con adaptaciones para aprovechar la destilación solar. Según el Estudio 56 de Riego y Drenaje de la FAO (Allen *et al.*, 2006), se conoce como evapotranspiración (ET) a la combinación de dos procesos separados por los que el agua se mueve desde el suelo hasta la atmósfera, a través de la superficie del suelo por *evaporación* y por otra parte, mediante *transpiración* vegetal. La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos.

La evaporación de un suelo cultivado es determinada, principalmente, por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo y por la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo esta fracción de radiación solar disminuye a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo y finalmente, cuando la sombra cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal (Fig. 4.1), siendo los factores de incidencia: Radiación solar, Humedad relativa, Temperatura y velocidad del viento (Allen *et al.*, 2006).

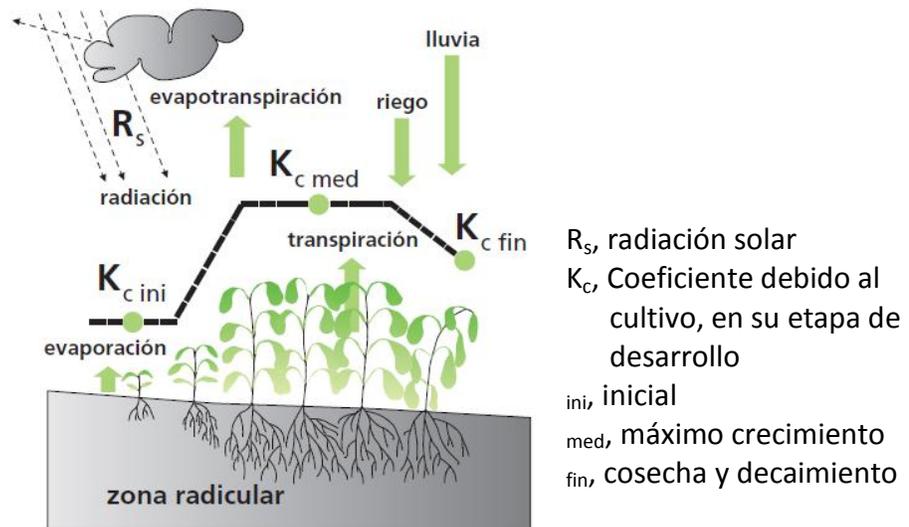


Fig. 4.1 Diagrama explicativo de la Evapotranspiración

Fuente: Allen *et al.*, 2006, Estudio FAO 56: Riego y Drenaje

La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie de evaporación es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie de evaporación y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. La evaporación de agua de un suelo sigue los mismos principios de evaporación en un destilador, con la diferencia de que el suelo tiene una menor superficie expuesta de agua, por lo que se calcula que sólo un porcentaje entre el 40 y el 80% de agua se evapora de un suelo húmedo comparado con un estanque de evaporación, en las mismas condiciones climáticas (Palacios Vélez, 1981). Así, el movimiento

del agua en respuesta a un gradiente de temperatura, requiere de un flujo de aire continuo. El agua del suelo se evapora en las partes más calientes, pasa a través de los poros y se condensa en las partes más frías. Es un proceso lento de movilidad del agua, aunque en suelos secos puede producirse un movimiento rápido (Ortiz-Villanueva, Ortiz-Solorio, 1990)

El movimiento capilar del agua ocurre en respuesta a un gradiente de tensión (presión negativa). La tensión resulta de la atracción de las moléculas del agua a la superficie de las partículas del suelo (adhesión) y de la atracción de las partículas del agua entre sí (cohesión). La fuerza considerada se denomina tensión de humedad del suelo. Entre más delgada sea la película de agua alrededor de las partículas del suelo y más pequeños los poros que están llenos de agua, mayor será la tensión de humedad del suelo. Cuando hay una diferencia de tensión de humedad del suelo, el agua tenderá a moverse lentamente de donde hay una tensión baja a donde hay una tensión alta (se respeta un gradiente de presión mayor a menor, pero en este caso son negativas, es decir, la mayor tensión tiene la mayor presión negativa o menor presión). Tal movimiento se conoce como movimiento capilar (Ortiz-Villanueva, Ortiz-Solorio, 1990).

Por su parte, la transpiración vegetal sigue otros principios, que son aprovechados en destiladores tipo invernadero. Aunque en el presente trabajo se emulará la transpiración vegetal con unidades físicas no susceptibles a la contaminación, no se contará con el sistema de estomas de las plantas, se emula el proceso de tensión-cohesión-adhesión que explica la elevación del agua a alturas mayores que las observadas por puras fuerzas capilares.

4.1 Transpiración vegetal

En las plantas, la transpiración consiste en la vaporización del agua líquida que es absorbida por las raíces del suelo, transportada en los tejidos de las plantas hasta las hojas y en el transporte del vapor de agua a la atmósfera a través de las estomas, predominantemente, y, en menor proporción, a través de la cutícula y la peridermis. Se ha estimado que una planta de maíz debe transpirar 600 kg de agua para producir un kg de granos de maíz seco, y para producir un kg de biomasa seca (incluyendo hojas, tallos y raíces) debe transpirar 225 kg de agua. De la cantidad total de agua que es absorbida del suelo, transportada en el tallo y transpirada hacia la atmósfera, solamente una fracción muy pequeña de 1% se incorpora a la biomasa (Martín de Santa Olalla Mañas *et al.*, 2005).

La principal función de la transpiración es inducir el flujo de agua a través de la planta, lo cual provee de un buen sistema de transporte para los minerales, que son absorbidos por las raíces y que se mueven a lo largo y alto de la planta. Así mismo, la absorción de agua del suelo, tiene un efecto en la movilización de sales minerales del suelo hacia la raíz, facilitando su absorción, sin un gasto de energía adicional, que implicaría la formación de masas de raíces que exploren amplias superficies de suelo.

Las relaciones hídricas en un cultivo, se muestran en la Fig. 4.2 (Loomis, Connor, 1992). Se puede observar la dirección del flujo de agua que hay en cada uno de los tres compartimientos del cultivo (raíz, tallo y cubierta vegetal), donde el contenido de agua de cada uno depende del tamaño y de los intercambios entre ellos y el xilema. El contenido de agua en el suelo es dependiente de la precipitación pluvial o del riego y el drenaje superficial e interno, así como la propia evaporación de agua desde el suelo.

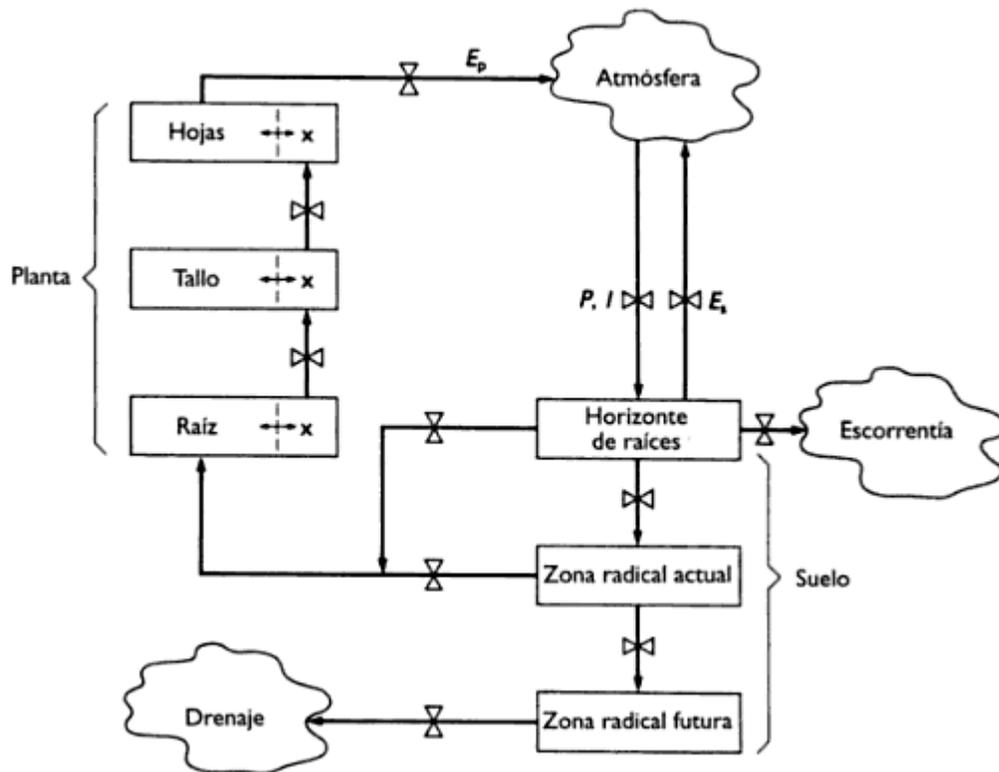


Fig. 4.2 Modelo de compartimientos para las relaciones hídricas de un cultivo. En el cultivo, los tejidos, las hojas, tallos y raíces están en contacto hidráulico con el xilema (x) a través del cual el agua fluye del suelo hasta la atmósfera. Fuente: Loomis, Connor, 1992

Otro efecto de la transpiración es la acción refrigerante de la hoja. La evaporación de agua de la superficie foliar, va acompañada por una pérdida de calor. El calor de evaporación del agua es aproximadamente 2250 J g^{-1} (600 cal g^{-1}), esta pérdida de calor ayuda a mantener una temperatura adecuada de la hoja, durante días muy soleados. La reducción de temperatura foliar por transpiración está en el orden de $2\text{-}3^\circ\text{C}$ por debajo de la temperatura del aire (Loomis, Connor, 1992).

La presión de vapor de agua en los espacios protegidos en las hojas está casi siempre próxima al valor de saturación (e^*), determinado por la temperatura de la hoja. La evaporación a partir de las células húmedas de las hojas reduce el contenido de agua y el potencial hídrico de las hojas. En respuesta, el agua se mueve pasivamente hacia ellas de la fase líquida de otras secciones de plantas hasta extraer más agua del suelo a través de gradientes de potencial ($\Delta\Psi$).

El agua se mueve en el interior de la planta siguiendo las diferencias de potencial (Ψ) hídrico. El potencial del agua del suelo se define como la cantidad de trabajo que debe realizarse por unidad de una cantidad especificada de agua pura para transportar de forma reversible e isotérmica una cantidad infinitesimal de agua desde una fuente específica hasta un destino especificado (Ortiz-Villanueva, Ortiz-Solorio, 1990).

- Si la cantidad especificada es volumen, el potencial (P) se expresa como presión [Pa]
- Si la cantidad especificada es peso, el potencial (H) se expresa como altura [m]
- Si la cantidad especificada es masa, el potencial (Ψ) se expresa en [J kg^{-1}]

Las formas de expresar el potencial del agua en el suelo se relacionan de la siguiente forma:

$$\frac{\Psi}{g} = \frac{P}{\rho_w g} = H \quad (\text{Ec. 9})$$

Así, 100 J kg^{-1} es igual a 10^5 Pa (1 atm) y a 10.33 m de agua

El potencial hídrico (Ψ_H) consta de varios componentes (Ortiz-Villanueva, Ortiz-Solorio, 1990):

$$\text{Potencial Hídrico} = \Psi_{\text{osmótico}} + \Psi_{\text{Presión}} + \Psi_{\text{matricial}} + \Psi_{\text{gravitacional}} \quad (\text{Ec. 10})$$

- Potencial osmótico: está relacionado con la presión osmótica de la disolución acuosa. Depende de la cantidad de los solutos disueltos en el agua.
- Potencial de presión: es el relacionado con la presión que ejercen las paredes celulares vegetales contra la célula. Es máximo cuando alcanza la máxima turgencia y mínimo cuando alcanza el valor de plasmólisis incipiente.
- Potencial matricial: está relacionado con la absorción por capilaridad del agua.
- Potencial gravitacional: es aquel relacionado con la fuerza de gravedad.

Así el agua viaja desde las zonas con mayor potencial hídrico hacia las zonas con menores potenciales. Una planta en un suelo óptimo (potencial hídrico cercano a 0 kPa) absorbería agua por las raíces, viajaría por el xilema, llegaría a las hojas donde se evaporaría y pasaría a la atmósfera, la cual tiene un potencial hídrico realmente bajo

(del orden de decenas de kPa negativo o alta tensión de humedad). Este proceso descrito se llama transpiración. Así la mayoría del agua absorbida por la planta es evaporada en las hojas. Estas fuerzas de evaporación de la vida de todos crean una tensión negativa que es la que "tira" del agua hacia las ramas superiores ya que el proceso de capilaridad no es suficiente para llevar el agua a varios metros de altura. Por último existe otra fuerza que hace subir el agua por el xilema de la planta, es una presión positiva ejercida por la raíz que absorbe agua activamente (gracias a la diferencia de concentración de solutos al interior y exterior de las raíces, que crea el potencial osmótico).

Con el sistema suelo-agua-atmósfera, el flux del agua (F) entre compartimientos contiguos se expresa como $F = -k\Delta\Psi$ o bien, $F = -\Delta\Psi/r$, donde $\Delta\Psi$ es la diferencia de potencial hídrico, k es la conductividad hidráulica y $r (=1/k)$ es la resistencia al fluido. La capacidad del tejido para perder o ganar agua se puede denominar capacitancia ($d\theta/d\Psi$) en forma análoga al circuito eléctrico (Loomis y Connor, 1992).

El factor que tiene mayor importancia en la transpiración vegetal es el área foliar o cobertura vegetal, sin embargo, es de considerar que la transpiración es mucho menor en un cultivo que en un árbol. El tamaño de poro estomático cuando se encuentra abierto al máximo oscila entre 3-12 μm de ancho y 10-40 μm de largo. Además, resulta de gran ayuda la expansión del área radicular (Martín de Santa Olalla Mañas *et al.*, 2005).

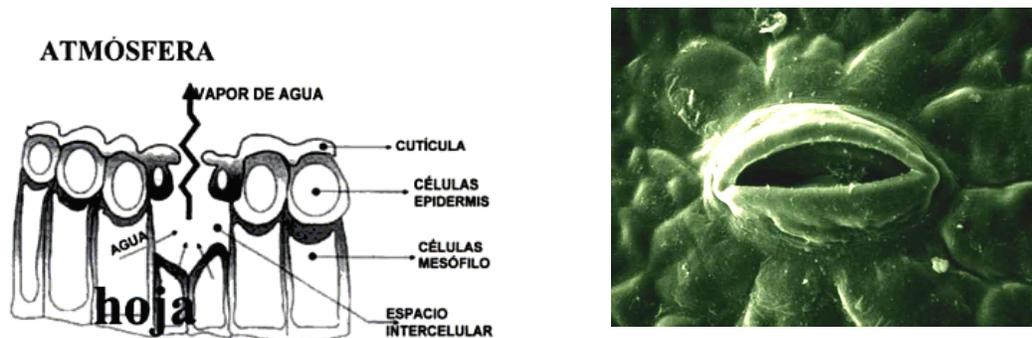


Fig. 4.3 Estoma: a) Estructura de una hoja y funcionamiento esquemático de una estoma
b) Imagen al microscopio electrónico de una estoma abierto

Son los poros mayores de 50 μm , los que se asocian a la conductividad hidráulica (K) (Carter, Ball, 1993). El tamaño de los poros más grandes llenos de agua se pueden describir matemáticamente:

(Ec. 11)

$$d = \frac{4\sigma \cos \alpha}{\rho_w gh}$$

donde:

d	diámetro de los poros más grandes que quedan llenos de agua después de aplicar una determinada potencia [m]
h	potencial [m]
σ	tensión superficial del agua [0.0727 J m ⁻² a 20°C]
α	ángulo de contacto del agua almacenada en el poro (igual a cero)
ρ_w	densidad del agua [998 kg m ⁻³]
g	constante de la aceleración de la gravedad [9.8 m s ⁻²]

Para describir el drenaje del agua desde un poro esférico se utiliza:

$$\Psi = \frac{-4\sigma}{d\rho_w} \quad (\text{Ec. 12})$$

La capilaridad es un fenómeno que se debe a dos fuerzas: la fuerza de atracción del agua por las paredes del canal a través del cual se mueve (adhesión) y la tensión superficial del agua que es debida a la elevada atracción entre las moléculas de agua (cohesión). La altura de ascenso por un tubo capilar viene dada por:

$$H = \frac{2\sigma}{R\rho_w g} \quad (\text{Ec. 13})$$

donde:

H	altura de ascenso por un tubo capilar [m]
σ	tensión superficial del agua [0.0727 J m ⁻² a 20°C]
R	Radio capilar[m]
ρ_w	densidad del agua [998 kg m ⁻³]
g	constante de la aceleración de la gravedad [9.8 m s ⁻²]

Es decir, si un poro tiene un diámetro de 50 μm, a una temperatura de 20°C, la altura de ascenso del agua será aproximadamente:

$$H = \frac{2 \times 0.0727}{25 \times 10^{-6} \times 998 \times 9.8} = 0.59 \text{ m}$$

Ello implica que la pura capilaridad no es el único fenómeno por el cual un árbol eleva agua desde las raíces en el suelo hasta los metros de altura de sus ramas y hojas más altas. El fenómeno se debe a la suma de potenciales referidos como explican Raven *et al.* (1992):

- La diferencia en concentraciones entre la savia de las células de las raíces de una planta y el agua del suelo, causan una presión “osmótica”. Esta presión hace que el agua del suelo se mueva a través de las membranas semipermeables de las raíces, hasta llegar a las células (nutrientes). Una salinidad alta en el disolvente del agua del suelo y/o una alta tensión debido a la humedad del suelo puede reducir o prevenir la transferencia osmótica.
- Una vez dentro de las raíces, el agua es transferida por toda la planta. La explicación actualmente aceptada es la teoría de la coheso-tenso-transpiratorio, originalmente propuesta por Dixon en 1894 (Fernández, Johnston, 1986). Al evaporarse agua de las hojas, se reemplaza por agua del interior de las células. Como resultado se incrementa la concentración de solutos al interior de la célula, estableciéndose una diferencia de potencial hídrico entre estas células y las adyacentes, más saturadas. Esta cadena se extiende hasta alcanzar un vaso y ejerce un “tirón” o tensión en el xilema. Debido a la extraordinaria cohesión entre las moléculas de agua, esta tensión se transmite desde el tallo hasta las raíces.

Se demuestra este fenómeno con un experimento ilustrado en la Fig. 4.4. Una vasija de cerámica porosa se llena de agua y se une al extremo de un tubo largo y estrecho de vidrio que también se llena de agua. Este tubo se une por el extremo inferior a un recipiente que contiene mercurio. El agua se evapora a través de los poros de la cerámica y es reemplazada por agua que es “tirada” por arriba de un extremo al otro del tubo como una columna continua. A medida que el agua sube, el mercurio es arrastrado al interior del tubo para reemplazarla, creando la presión negativa o tensión, igual que en la planta (Raven *et al.*, 1992).

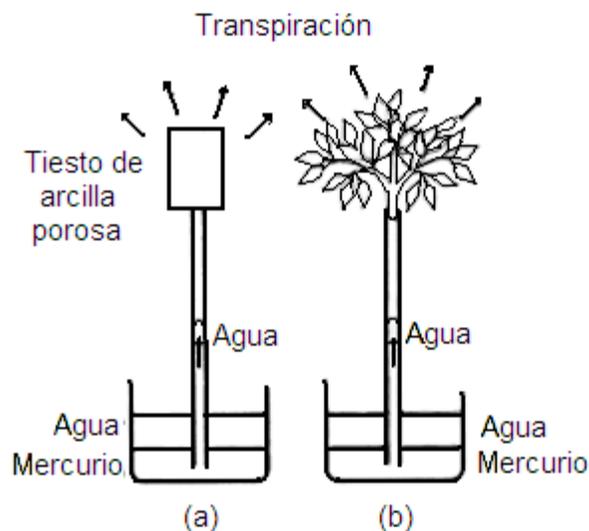


Fig. 4.4 Demostración de la teoría coheso-tenso-transpiratoria

- En las hojas, el aire entra a su epidermis a través de ciertas aberturas llamadas estomas, los cloroplastos dentro de la hoja usan el bióxido de carbono del aire y una parte del agua disponible para generar los carbohidratos necesarios para el crecimiento de la planta (fotosíntesis). Conforme el aire entra a la hoja, escapa agua a través de las estomas abiertas y a este proceso se le denomina “transpiración”.

La transpiración se ve limitada por la velocidad con que las plantas disponen de la humedad. El agua disponible varía con el tipo de suelo y va desde 0.5 mm cm⁻¹ de profundidad para arenas, hasta 2 mm cm⁻¹ para arcillas con materia vegetal. La transpiración por unidad de área depende además, de la cubierta vegetal, procede más rápidamente de día que de noche, así como con mayor temperatura ambiental, con menor humedad relativa ambiental, con mayor velocidad del viento (hasta el límite en que la planta cierra los estomas, a veces cuando el viento llega a 50 km h⁻¹). Desde luego, están las modificaciones genéticas que modifican las propias estomas en plantas adaptadas a climas áridos (Fernández, Johnston, 1986).

El tipo de planta es un factor importante en el control de la transpiración, principalmente cuando la humedad del suelo se ve limitada. Especies con raíces poco profundas no podrán obtener agua cuando el suelo se seque; de aquí que la vegetación con raíces profundas transpire mayor cantidad de agua en tiempos de sequía que las anteriores. No es de extrañar que la adaptación de los vegetales implique raíces poco profundas donde existe abundancia de agua pluvial o de riego y que los vegetales de raíces profundas se desarrollen en sistemas áridos (Ortiz-Villanueva y Ortiz-Solorio, 1990).

4.2 Evapotranspiración en invernaderos

Los trabajos de evaluación de la energía en un invernadero encontraron que la evapotranspiración era un factor importante para la conducción de agua de riego en los cultivos a la atmósfera, como se puede encontrar en las publicaciones de los años 80's del siglo XX, pero fue iniciado el siglo XXI cuando se consideró el aprovechamiento del agua de evapotranspiración vegetal que se condensaba en los techos de los invernaderos.

Así, Ido Seginer (1984) ya notaba que, de la energía suministrada en un invernadero para la producción vegetal, especialmente para el control de la temperatura, no se perdía toda la energía, ya que se recuperaba una parte por la condensación en la cubierta del invernadero.

De acuerdo con Kozai *et al.* (1982), la pérdida de energía en un invernadero es de alrededor de la mitad de la energía requerida para evapotranspiración y es equivalente a 10 W m^{-2} , aproximadamente.

El modelo de evapotranspiración utilizado por Ido Seginer (1984), establece que:

$$E_l = \frac{\rho (q_l - q_a)}{r_l + r_a} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

- E_l : Tasa de transpiración de ambos lados de una hoja, [$\text{kg H}_2\text{O m}^{-2}$ de hoja s^{-1}];
- ρ : Densidad del aire, [kg de aire m^{-3}];
- q_l : Humedad de saturación específica dentro de la hoja [$\text{kg H}_2\text{O kg}^{-1}$ aire];
- q_a : Humedad de saturación específica del aire ambiente [$\text{kg H}_2\text{O kg}^{-1}$ aire];
- r_l y r_a : resistencia a la difusión de la hoja (l) y del aire (a), respectivamente, [s m^{-1}].

Asume que, en un invernadero sin ventilación, la transferencia de calor de la hoja al aire se realiza por convección libre por lo que se toma del Manual de la Sociedad Americana de Energía de Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, 1981), los coeficientes de transferencia, h :

$$h = \frac{\rho c}{r_a} = 1.9 \left[\frac{T_a - T_l}{L} \right]^{0.25} \quad \text{Ec. 15}$$

- h : Coeficiente de transferencia, [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$];
- T_l y T_a : Temperatura de la hoja (l) y del aire (a), respectivamente, [K];
- L : Característica de la dimensión de la hoja, [m];
- c : Calor específico del aire, [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$];
- ρ : Densidad del aire, [kg de aire m^{-3}];
- r_a : resistencia a la difusión del aire (a), [en s m^{-1}].

En las plantas, se espera que la resistencia a la difusión en las hojas r_l sea mucho mayor a la del aire r_a en horarios nocturnos, debido al cierre de estomas.

Midiendo E_l , q_l , q_a , calculando r_a se obtiene r_l . Para ello se requiere determinar la temperatura de la hoja y del ambiente, la humedad específica del aire y la tasa de transpiración dentro del invernadero (pesando la pérdida de peso nocturna) y dividiendo este factor entre el índice de área de hoja (m^2 hoja m^{-2} suelo).

Una vez que todos los coeficientes se reúnen, Seginer (1984) establece que la evapotranspiración es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas

exterior e interior del invernadero y que el coeficiente de proporcionalidad aumenta en forma directa, con el área foliar. En su caso obtuvo:

$$E_i = 0.7 \times 10^{-3} (T_i - T_o) \quad [\text{mm h}^{-1}] \quad \text{Ec. 17}$$

Recientemente se encuentran trabajos que procuran mejorar el aprovechamiento del espacio al interior de un invernadero. Así Sethi, Dubey (2011), proponen colocar charolas con plántulas en crecimiento para sustitución de las plantas cultivadas en el suelo.

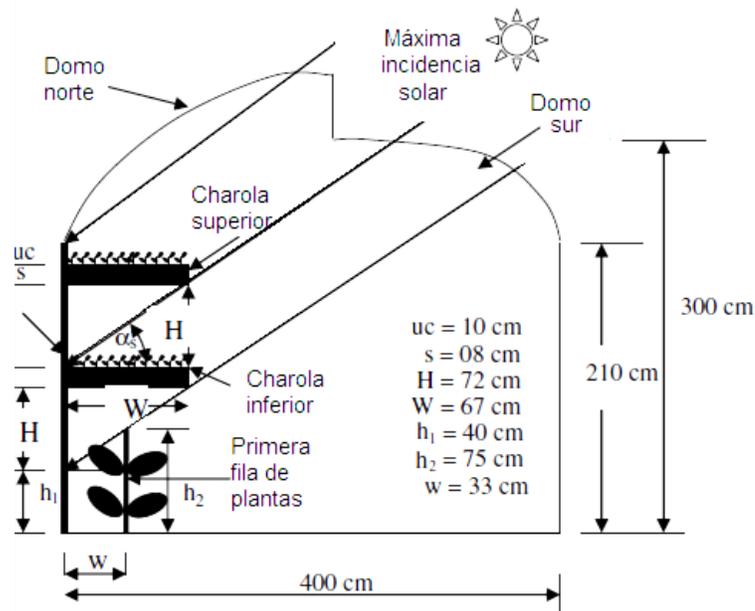


Fig. 4.5 Aprovechamiento de energía solar con plántulas en un invernadero.

Davies, Paton (2005) manifestaban que una de las grandes limitantes de la aplicación de la destilación solar era que ocupa sustanciales áreas de terreno, y posteriormente, la seguridad que los componentes de sus instalaciones requerían y los requerimientos de acceso y servicios generales. Así, se pensó en ocupar áreas ya destinadas con cubiertas semejantes al destilador solar, como son los invernaderos. En un destilador adaptado al techo de un invernadero, la producción de agua estimada está en el intervalo de 0.4 a 1.6 kg d⁻¹ m⁻² (Chaibi, 2000; García Marí *et al.*, 2007).

Estos modelos de invernaderos aprovechados como destiladores solares, no utilizan directamente el agua salina para alimentar las plantas, pues la producción vegetal, propósito principal de un invernadero, se vería drásticamente afectada y pronto no habría plantas para efectuar la evapotranspiración tampoco. Se trata de una adaptación para aprovechar todo el techo (Fig. 4.6 a) o sólo una sección (Fig. 4.6 b) para colocar un recipiente con agua salada (principalmente la recirculación del drenaje), en material transparente para no impedir la entrada de luz a las plantas y

recuperar el destilado en canaletas laterales a la parte inferior del techo (García Marí *et al.*, 2007).

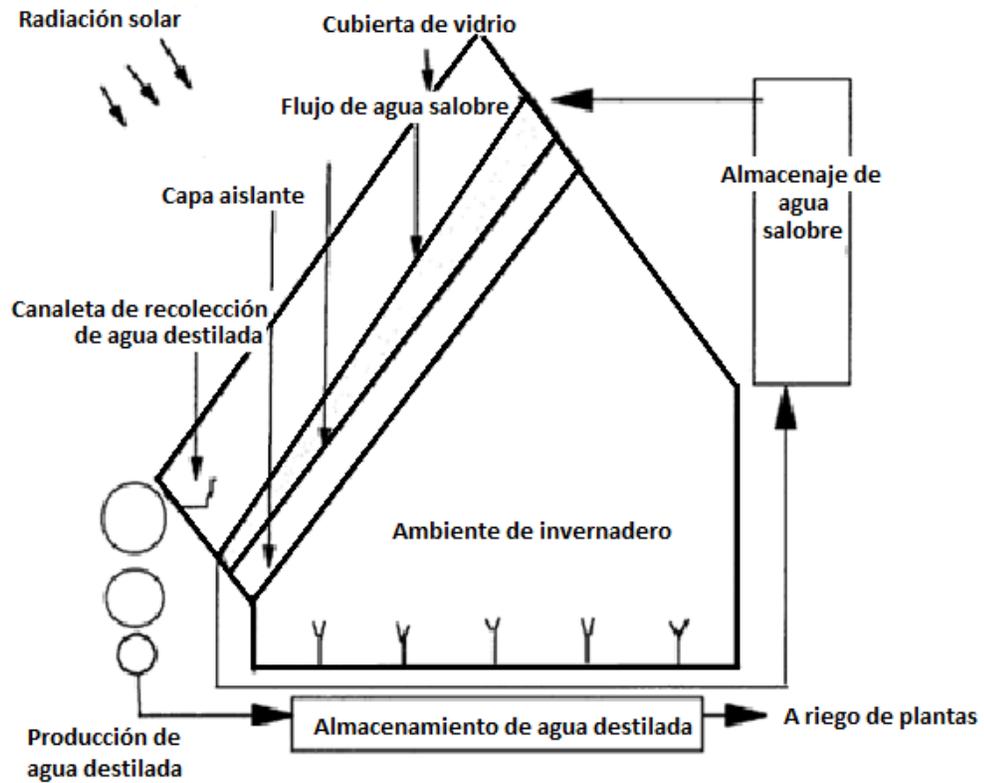


Fig. 4.6 a) Invernadero en Túnez (Chaibi, 2000)

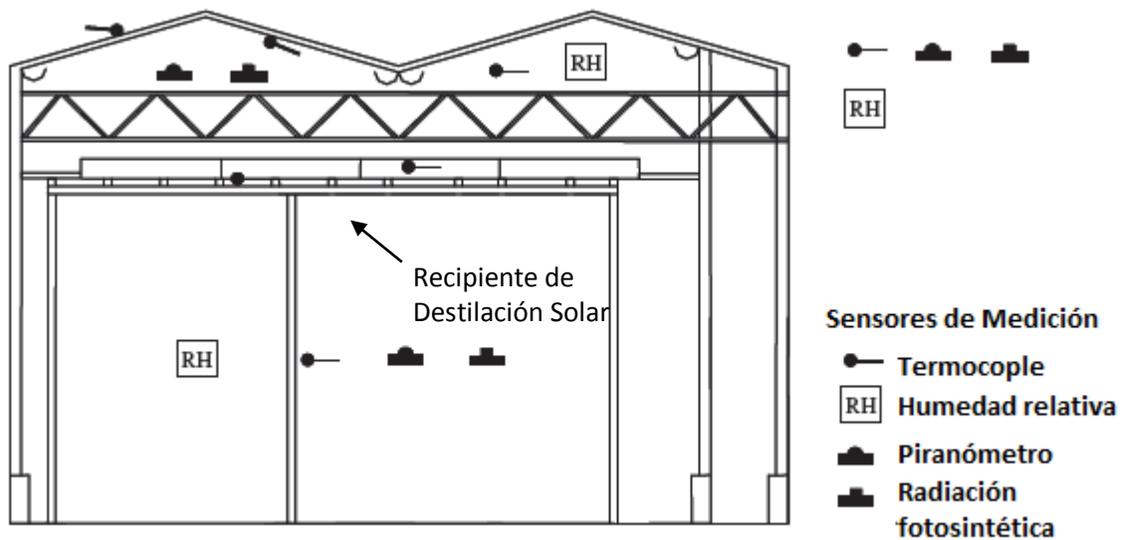


Fig. 4.6 b) Invernadero en España (García Marí *et al.*, 2007)

Fig. 4.6 Sistemas de desalinización de agua integrados al techo de un invernadero.

Como se mencionó en el apartado 3.2 referente a modelos de destilación solar, estos destiladores solares acoplados a invernaderos se apoyan también en el trabajo de Dunkle para desarrollar su modelo de transferencia de calor, considerando la correlación de Nayak para presentar la presión parcial atmosférica en términos de temperatura.

Por su parte, Davies, Paton (2005) desarrollaron un sistema de conducción de agua salina a lo largo del techo de invernaderos de gran escala (largo 42 m, ancho 18 m, altura 5.5 m) en los Emiratos Árabes Unidos, analizando las diferentes formas de circulación del vapor de destilado, aprovechando los sistemas instalados de ventilación del invernadero (flujo de aire de $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y, se lograba al conducir agua salina por un conjunto de tuberías cercanas al techo, encontrando mejores resultados en producción de agua y mejor temperatura ambiente para el desarrollo vegetal, pues además, la absorción de calor para destilación solar redujo la temperatura interior del invernadero de 50 a 30°C.

5. METODOLOGÍA

La determinación del potencial de mejoramiento de la calidad de agua de aguas salinas y salobres mediante un emulador del proceso de evapotranspiración, requirió diversas actividades teóricas y experimentales que permitieran identificar las variables que principalmente participan en el proceso, la forma en la que teóricamente se correlacionan, para lo cual se desarrolló un número adimensional, pruebas experimentales a nivel laboratorio para definir variables de control y finalmente, las pruebas experimentales en piloto, para comprobar la hipótesis de este trabajo de investigación.

5.1 Pruebas preliminares en dispositivo experimental de destilación

Se construyeron dos dispositivos experimentales con el fin de probar, en pareja, las características que influyen en la eficiencia de destilación solar, como son: materiales porosos que proporcionaran el incremento en área de evaporación sobre la misma superficie de suelo.

Cada dispositivo experimental consistió en un destilador solar con cubierta en forma de V invertida, fabricada con vidrio de 4 mm de espesor, con base de 0.57 m por 0.40 m, altura de 0.30 m y ángulo de 45° , para favorecer que las gotas que se fueran condensando en el techo se deslizaran hasta la canaleta recolectora y no cayeran sobre la bandeja de agua salada de 30 x 23 cm con 5 cm de profundidad (*Fig. 5.1*).



Fig. 5.1 Unidad experimental de Destilación Solar

Un sistema de adquisición de datos Onset HOBO Micro Station Data Logger, H21-002 y Silicon Pyranometer Smart Sensor registró la radiación solar y un segundo sistema Onset HOBO Temperature/RH/Light Data Logger 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 5.1:

TABLA 5.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES METEOROLÓGICOS

Sensor de	Intervalo de medición	Exactitud	Resolución	Tasa de muestreo
Radiación solar	0 a 1280 Wm ⁻²	± 10 Wm ⁻² ó ± 5%	1.25 Wm ⁻²	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.

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

Los experimentos se realizaron en el período comprendido entre abril y octubre de 2010, en Ciudad de México, que se encuentra en 19° 20' 01"N, 99° 11' 54 W y 2 268 m sobre el nivel del mar, según el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM (<http://www.geofisica.unam.mx/ors/ors-red.html>), abarcando muestras tanto en la estación lluviosa, como en la estación seca.

Se realizaron pruebas experimentales en pares, para incrementar el área de evapotranspiración considerando dos tipos de materiales sólidos absorbentes: hule espuma de poliuretano y tela de algodón y se comparó con el incremento al solo usar fondo negro, cuya bandeja tenía un área de 0.69 m² (30 x 23 cm).

Finalmente, uno de los sistemas de destilación se equipó con un sistema capilar con base en material de hilo de algodón tejido, (del tipo usado en aplicaciones médicas, como las compresas y gasas, conocido en el mercado como “pañalina”) material cuyos poros visibles son de 0.5 mm de diámetro, con un área superficial de 0.207 m², que sumada a los 0.069 m² de la bandeja dieron una total de área de evapotranspiración de 0.276 m², 4 veces el área de evaporación de la pura bandeja de agua salina.

Para los experimentos se utilizó como reactivo sal marina yodatada - fluorada obtenida por evaporación solar, en Baja California, México.

El protocolo incluye:

- a) Preparación del agua salina a la concentración de 35,000 mg por litro, colocando 35 gramos de sal marina (o la concentración indicada en la Tabla 5.2) y aforando a un litro con agua destilada.
- b) Llenado de la bandeja de agua salina con 2 litros, hasta 3 cm de profundidad y, en su caso, colocación de superficie de evapotranspiración.
- c) Programación del adquisidor de datos de temperatura del agua salina, del aire en el techo al interior y al exterior del destilador, así como de radiación solar, humedad relativa y luminosidad al interior del destilador, para registro cada 15 minutos durante 24 horas.
- d) Inicio de los ensayos a las 8:00 horas y conclusión a las 7:00 horas del día siguiente.
- e) Recolección y mediciones de agua destilada y agua salina concentrada.
- f) Enjuague diario de la bandeja de agua salina y enjuague semanal del material poroso. Esto impidió la saturación de sal durante la experimentación.

La preparación de las aguas se realizó en las concentraciones de la Tabla 5.2:

TABLA 5.2. CONCENTRACIÓN DE SALES EN LOS TIPOS DE AGUA EXPERIMENTADOS

Tipo agua	Lugar	C_i : Concentración de sales mg L^{-1}	C_w : Concentración de agua, kg m^{-3}
Salobre	Sonora	10,000	990
Marina	BCS	35,000	965
Salmuera	Efluente sistema de desalinización	150,000	850

Las concentraciones indican 3 grupos importantes de agua: la de acuíferos salobres encontrados en toda la zona norte de la República Mexicana, la propiamente agua de mar para abastecimiento de zonas costeras y finalmente, el manejo de salmueras producto de sistemas de desalinización.

5.2 Desarrollo de un parámetro adimensional

En el afán de comprender el comportamiento de las variables que participan en los fenómenos de destilación solar y evapotranspiración, como son: área superficial destinada a la evapotranspiración, área superficial de absorción de aguas salinas y salobres, concentración de sales en la fuente de abastecimiento con respecto al caudal de agua dulce obtenida y el gradiente de temperatura, que es dependiente de la ubicación geográfica, la estación del año y las condiciones meteorológicas, se realizó la agrupación de las variables con el propósito de obtener un parámetro adimensional que posibilitara expresar el problema en términos de la relación funcional de este parámetro aplicando el teorema de Buckingham.

En un inicio se consideraron las variables que se deseaba correlacionar, sin perder de vista que existen otras variables que pueden participar en el sistema. Así:

- Tasa de agua destilada producida ($E A_{se}$). en $\text{kg H}_2\text{O m}^{-2}$ de $A_{se} \text{ d}^{-1}$ $[\text{M L}^{-2}\text{t}^{-1}]$
- Caudal de agua destilada producida (Q_E) $\text{kg H}_2\text{O d}^{-1}$ $[\text{M t}^{-1}]$
- Gradiente temperatura interior–exterior (ΔT) $[\text{K}]$
- Superficie de terreno (St) $[\text{L}^2]$
- Área superficial expuesta a evaporación (A_{se}) $[\text{L}^2]$
- Concentración de agua en influente (C_i) $[\text{M L}^{-3}]$
(dado que es el agua, no las sales, la que se evapora)

Otras Variables:

- Densidad de flujo térmico (q) $[\text{M t}^{-3}] = (\text{W m}^{-2})$
- Coeficiente de transferencia de masa (h_m) $[\text{L t}^{-1}]$
- Coeficiente de transferencia de calor convectivo (h_{cv}) $[\text{M t}^{-3}\text{K}^{-1}] = (\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1})$
- Humedad absoluta (H_a) $[\text{M L}^{-3}]$
- Velocidad de conducción del aire (v_{aire}) $[\text{L t}^{-1}]$

Considerando las variables básicas, se planteó colocarlas en función del objetivo central que es la producción de agua destilada en función de la superficie de evapotranspiración. De este modo, en lugar de utilizar la tasa de agua destilada obtenida ($E A_{se}$). en $\text{kg H}_2\text{O m}^{-2}$ de $A_{se} \text{ d}^{-1}$ $[\text{M L}^{-2}\text{t}^{-1}]$, se establecen dos términos: el Caudal de agua destilada producida (Q_E) $\text{kg H}_2\text{O d}^{-1}$ $[\text{M t}^{-1}]$ como variable dependiente, en función del Área superficial expuesta a evaporación (A_{se}) en m^2 $[\text{L}^2]$.

Para las variables tiempo y temperatura, se utiliza la variable conocida como el *Coefficiente de transferencia de calor* (h), medido en $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$, con dimensiones $[\text{M t}^{-3}\text{K}^{-1}]$, pues precisamente se establece la velocidad de transferencia de energía desde el sistema al fluido se calcula por la expresión conocida como Ley de Newton del enfriamiento (Moran, Chapiro, 2005):

$$q = h A (T_s - T_f) \quad \text{Ec. 17}$$

donde:

- q : flujo térmico, medido en W [$\text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$]
- A : área de la superficie [m^2]
- T_s : temperatura de la superficie [K]
- T_f : temperatura de fluido fuera de la superficie [K]
- h : factor de proporcionalidad conocida como coeficiente de transferencia de calor, medido en $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ [$\text{M t}^{-3}\text{K}^{-1}$]

5.3 Pruebas experimentales piloto en casetas de desalinización

El uso del número adimensional Vega-Silva N_{VS} , fue puramente un tratamiento teórico, pues en la unidad experimental tamaño laboratorio sólo fue posible experimentar con y sin una cantidad de tela. Por ello, se desarrollaron pruebas piloto, donde se probó diferentes cantidades de tela, que se constituyeron en diferentes *índices de área superficial de evapotranspiración/superficie de terreno (Ase/St)* y se establecieron las condiciones en que se vería limitado el incremento en la producción de agua destilada, que no se pretende llegue al infinito en un mismo sistema cerrado.

5.3.1 Diseño y construcción de la caseta de desalinización y sus elementos

La comparación de un sistema de destilación solar tipo caseta con la propuesta de destilación solar con base en evapotranspiración tiene una diferencia constructiva, ya que el prototipo se asemeja más a un invernadero que a una caseta. Sin embargo, una vez comprobado en los sistemas experimentales preliminares que existen diferencias significativas en la velocidad y capacidad de evaporación, utilizando en ambos casos destiladores tipo caseta, se decidió favorecer la investigación en una instalación como la que se espera funcione el nuevo sistema, con mayor volumen que el tipo caseta, para favorecer la producción de agua destilada con base en evapotranspiración.

Se construyeron dos casetas de desalinización idénticas, con la finalidad de poder realizar experimentos de comparación simple, la caseta de desalinización A para implementar el proceso de evapotranspiración y la caseta de desalinización b, como elemento de comparación, con un destilador solar (*Fig. 5.2*).

Las dimensiones de la caseta de desalinización con base en energía solar 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°
- Dirección de incidencia solar Este - Oeste

Se colocaron 4 canaletas de agua cruda con dimensiones de 1.5 m de largo por 0.25 m de ancho con una profundidad de 0.04 m (y un bordo libre de 0.01 m) para contar con un volumen individual de 15 litros y un volumen global de 60 litros por caseta de desalinización.



Fig. 5.2 Detalles de la construcción de las casetas de desalinización solar

Los materiales utilizados fueron diferentes que los convencionales, por considerar que su ubicación más probable fuera en techos o azoteas de casas y edificios, que no fueron diseñados para carga, y sus costos son sensiblemente menores, sin mencionar la facilidad de cambio de piezas dañadas. De hecho, es ya difícil encontrar en el mercado un invernadero de cristal, habiendo infinidad de modelos en plástico o en policarbonato.

Por ello, se seleccionó como material de las paredes el policarbonato (polímero formado de moléculas de bisfenol-A unidas a grupos de carbonato), con las características mostradas en la tabla 5.3, que permiten considerarlo como sustituto del vidrio:

TABLA 5.3 CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DE POLICARBONATO Y VIDRIO

	Policarbonato ^a	Vidrio ^b
Espesor	4 mm	4 mm
Densidad	1.20 g cm ⁻³	2.5 g cm ⁻³
Índice de refracción	1.586 a 20°C	1.52
Índice de transmisión lumínica	85%	<91.7%
Grado de Inflamabilidad	V0-960°C	960°C

Fuente:^ahttps://plastics.bayer.com/plastics/emea/en/product/makrolon/product_datasheets/Makrolon_AG2677_ISO/gradeId-1001/datasheethtml.jsp

^b<http://www.agc-solar.com/agc-solar-products/patterned-glass/solite.html>

Puede observarse que el policarbonato es un material mucho más ligero, lo que permite utilizar como marco un material como el aluminio, menos pesado que el hierro, tradicionalmente usado en invernaderos de vidrio.

Entre sus desventajas tenemos mayor índice de refracción, menor transmisión de luminosidad, especialmente de la luz ultravioleta y que es susceptible a abrasivos.

Las casetas de desalinización tipo invernadero fueron dotadas de los mismos sistemas de adquisición de datos que las casetas de destilación experimentales. De igual manera se realizaron las mediciones de temperatura ambiental exterior (*Fig. 5.3*) e interior (*Fig. 5.4b*), así como temperatura de agua salina por evaporar, de la radiación solar (*Fig. 5.4a*) y además de la luminosidad y de la humedad relativa (*Fig. 5.4b*) del ambiente.



Fig. 5.3 Termómetro ambiental para mediciones al exterior de la Caseta



a) Piranómetro para medición de radiación solar



b) Sensores de temperatura (2), luminosidad, y humedad relativa

Fig. 5.4 Adquisidores de datos meteorológicos

5.3.2 Elementos del sistema de evapotranspiración

La caseta de desalinización A, destinada a probar el sistema de evapotranspiración, fue dotada de un sistema capilar con base en el hilado trenzado de la tela de algodón, conocida en el mercado como “pañalina”, material cuyos poros visibles tienen 0.5 mm de diámetro, pero el trenzado de los hilos cumple con las características de capilaridad, que permite el ascenso del agua.

Al elevar el sistema capilar sobre el contenedor de agua salada, como las velas de un barco, se logra ocupar una mayor área superficial de evaporación, al igual que las hojas de los árboles aumentan sensiblemente el área de evapotranspiración.

De esta manera, la caseta de desalinización B, destinada como destilador solar cuenta con un área de evaporación de 1.5 m² (Fig. 5.5), mientras que la caseta de desalinización A, destinada al sistema de evapotranspiración se incrementa el área de evaporación de las canaletas gracias a que cada tela expone una superficie de 0.6 m ancho por 1 m de altura y se colocan en cada una de las 4 canaletas, de una a 4 telas, en función del nivel de tratamiento seleccionado (Fig. 5.6).



Fig. 5.5 Canaletas de agua salina o salobre, comunes a las casetas de desalinización solar



Fig. 5.6 Sistema de evapotranspiración de la caseta de desalinización solar A

5.3.3 Desarrollo experimental

Para la determinación de la influencia de área de evapotranspiración en la producción de agua destilada, a fin de optimizar el área de terreno dedicada a la desalinización del agua (objetivo 1.3.3), se desarrollaron los siguientes experimentos en las casetas de desalinización con base en energía solar.

Experimento 1. Verificación de semejanza en las respuestas de las casetas A y B

Objetivo: Corroborar que las unidades experimentales operan en forma semejante y pueden ser contrastadas.

Diseño experimental: Comparación de medias simple $\mu_{CA} \neq \mu_{CB}$

Hipótesis: *Hipótesis Nula (H_0): No habrá diferencias significativas entre las Casetas A y B, es decir, las medias de las muestras pertenecen a la misma población.

**Hipótesis Alternativa (H_A): La producción de agua destilada de la caseta A será diferente a la producción de la caseta B.

Parámetros de control: * Mismas condiciones meteorológicas para ambas casetas en cada ensayo, variaciones importantes en condiciones meteorológicas en ensayos diferentes (Fig. 5.7).

** Volumen a destilar por caseta: 60 Litros distribuidos en 4 canaletas. Concentración de influente: 35,000 mg L⁻¹



Fig. 5.7 Verificación de semejanza en funcionamiento de casetas

Experimento 2 Evaluación de la capacidad de producción de agua destilada al incrementar el área de evapotranspiración aplicando superficies porosas (tela de algodón)

Objetivo: Probar la hipótesis del trabajo de investigación doctoral, permite analizar el efecto del tratamiento $H_0 \neq H_A$ mediante Análisis de Varianza (ANOVA).

Tratamiento: Área de evaporación (superficie expuesta en las canaletas: 1.5 m²) más área de evapotranspiración (superficie de telas expuestas, cada tela expone superficie de 0.6 m ancho por 1 m de altura y se colocan en cada una de las 4 canaletas), conforme se presenta en la Tabla 5.3.

TABLA 5.4 NIVELES DEL TRATAMIENTO EXPERIMENTO 2.

Nivel	Suma de áreas	Índice Ase/St*
0	1.5 m ²	1
1	1.5 + 2.4 = 3.9 m ²	2.6
2	1.5 + 4.8 = 6.3 m ²	4.2
3	1.5 + 7.2 = 8.7 m ²	5.8
4	1.5 + 9.6 = 11.1 m ²	7.4

* Índice de área superficial de evapotranspiración/superficie de terreno (Ase/St)

Diseño experimental: Análisis de Varianza (ANOVA)

Hipótesis: *Hipótesis Nula (H_0): La producción de agua destilada corresponde a la misma población, es decir, no habrá diferencias significativas al incrementar la superficie de evapotranspiración

**Hipótesis Alternativa (H_A): La producción de agua destilada de la caseta A se incrementará con el aumento del área de evapotranspiración que se logra al incorporar superficies porosas verticales (telas) en contacto con las canaletas receptoras de agua salina.

Parámetros de control: * Debido a las importantes variaciones de las condiciones meteorológicas entre diferentes ensayos, se comparará el incremento en producción de la caseta A con respecto a la caseta B, la cual no incorporará superficie de evapotranspiración (Fig.5.8).

** Volumen a destilar por caseta: 60 Litros distribuidos en 4 canaletas. Concentración de influente: 35,000 mg L⁻¹.



Caseta A

Área de evapotranspiración= 6.3 m²

Con 2 telas en cada canaleta



Caseta B

Área de evaporación= 1.5 m²

Fig. 5.8 Casetas de desalinización de evapotranspiración y de evaporación

El protocolo de operación es el mismo que el utilizado en el modelo experimental de caseta, con la diferencia que la preparación de agua salina se incrementó a 60 Litros por corrida y que se utilizó un recolector de agua destilada mediante una canaleta al final de los paneles que se conectó, cada una, mediante manguera a un matraz protegido por una cámara de unisel, evitando así que la elevada temperatura al interior del invernadero volviera a evaporar el agua destilada (Fig. 5.9).



Fig. 5.9 Recuperación de destilado en Casetas de Desalinización

Experimento 3 Evaluación de las concentraciones en la producción de agua destilada y en la salmuera con la mejor área de evapotranspiración

Objetivo: Evaluar la concentración de sales obtenida en el agua destilada y obtenida en la salmuera producto de la destilación.

Diseño experimental: Comparación de medias simple $\mu_{CA} \neq \mu_{CB}$

Hipótesis: *Hipótesis Nula (H_0): No habrá diferencias significativas entre las concentraciones de sales de agua destilada y de salmuera con relación a las diferencias de concentración inicial es decir, las medias de las muestras pertenecen a la misma población.
**Hipótesis Alternativa (H_A): La concentración de sales en el agua destilada y en la salmuera se incrementarán con relación a la concentración inicial de sales.

Tratamiento: Concentración de sales inicial.

TABLA 5.5 NIVELES DEL TRATAMIENTO EXPERIMENTO 3.

Nivel	Concentración de sales, mg L ⁻¹
1	10,000
2	35,000
3	150,000

Parámetros de control: * Volumen a destilar por caseta: 60 Litros distribuidos en 4 canaletas.

6. RESULTADOS

Se presentan en este capítulo los resultados de las actividades teóricas y experimentales preparadas para la validación de la hipótesis de trabajo y los objetivos de la investigación. Se comienza con los resultados obtenidos del dispositivo experimental nivel laboratorio, que proporcionó información básica para el funcionamiento de un emulador del proceso de evapotranspiración en un destilador solar, se continúa con el desarrollo del número adimensional que permitió correlacionar las variables de estudio y finalmente, se presentan los resultados de las pruebas experimentales piloto en casetas de desalinización.

6.1 Pruebas preliminares en dispositivo experimental de destilación

Los dispositivos experimentales construidos con el fin de probar los materiales porosos que permitieron el incremento en área de evaporación sobre la misma superficie de suelo se presentan en las Figuras 6.1 y 6.2.



Fig. 6.1 Unidades de experimentación nivel laboratorio
Material poroso: tela de algodón

En la unidad dotada de la tela de algodón (Fig. 6.1), al aumentar el área superficial de exposición, se observó que la evaporación se acelera, comenzando a los 10 minutos,

en comparación con la unidad que solo tiene agua salina en la bandeja y que el total de agua evaporada fue 2.5 veces mayor.



*Fig.6.2 Destilador solar con un elemento sólido de absorción
Material poroso: hule espuma de poliuretano*

El destilador solar con el elemento sólido de absorción (Fig. 6.2) tuvo como resultados:

- Alta capacidad de absorción de agua salina y salobre, con marcas mostrando la elevación por capilaridad y el arrastre de la línea de salinidad.
- Baja capacidad de recuperación de agua destilada, no se formaron gotas de condensación en el techo del destilador.

Por ello, fue descartado como elemento de evapotranspiración, continuando la experimentación con las telas de algodón como material favorecedor de la evapotranspiración.

Durante el desarrollo de los experimentos en el dispositivo de laboratorio, se tomaron lecturas de las condiciones meteorológicas, en el periodo de abril a octubre del 2010 en la Ciudad de México, abarcando muestras del periodo de lluvias y de secas. Las condiciones ambientales entre las 12:00 y 16:00 horas, que corresponden a la máxima insolación, estuvieron en los intervalos mostrados en la Tabla 6.1.

TABLA 6.1 INTERVALO DE VALORES EN LOS PARÁMETROS AMBIENTALES MEDIDOS

PARÁMETROS	Mín.	Máx.	Dim.
Radiación Solar	353	1,116	$W m^{-2}$
Temperatura del Agua	50	68	$^{\circ}C$
Temperatura de cubierta	42	59	$^{\circ}C$
Humedad relativa	19	58	%
Luminosidad	5,000	24,000	lux

No parece ser necesario comentar que los valores de máxima radiación solar en días soleados, varían de muestran gran variabilidad en la Ciudad de México, posiblemente debido a la complejidad de su atmósfera y las fluctuaciones de la capa de contaminación, ocurriendo los mayores valores en los meses de abril y mayo y, que en días lluviosos de verano pueden haber pequeños claros que eleven en breves lapsos de tiempo, los registros de radiación desde 200 hasta 700 W m⁻².

En la Figura 6.3 se muestran los resultados de datos meteorológicos en dos gráficas, ambas se refieren a dos días consecutivos, un día soleado y el siguiente nublado, donde se muestra la temperatura del agua con una línea continua y la temperatura del aire en el interior cerca del techo aparece en una línea discontinua. Se muestra que aproximadamente una hora después de la irradiación solar máxima, el agua y la cubierta inician un proceso de enfriamiento, que favorece el aumento de la humedad relativa en el interior del destilador, y por lo tanto, la producción de agua destilada continúa después de la puesta del sol, en ausencia de radiación solar y de luz.

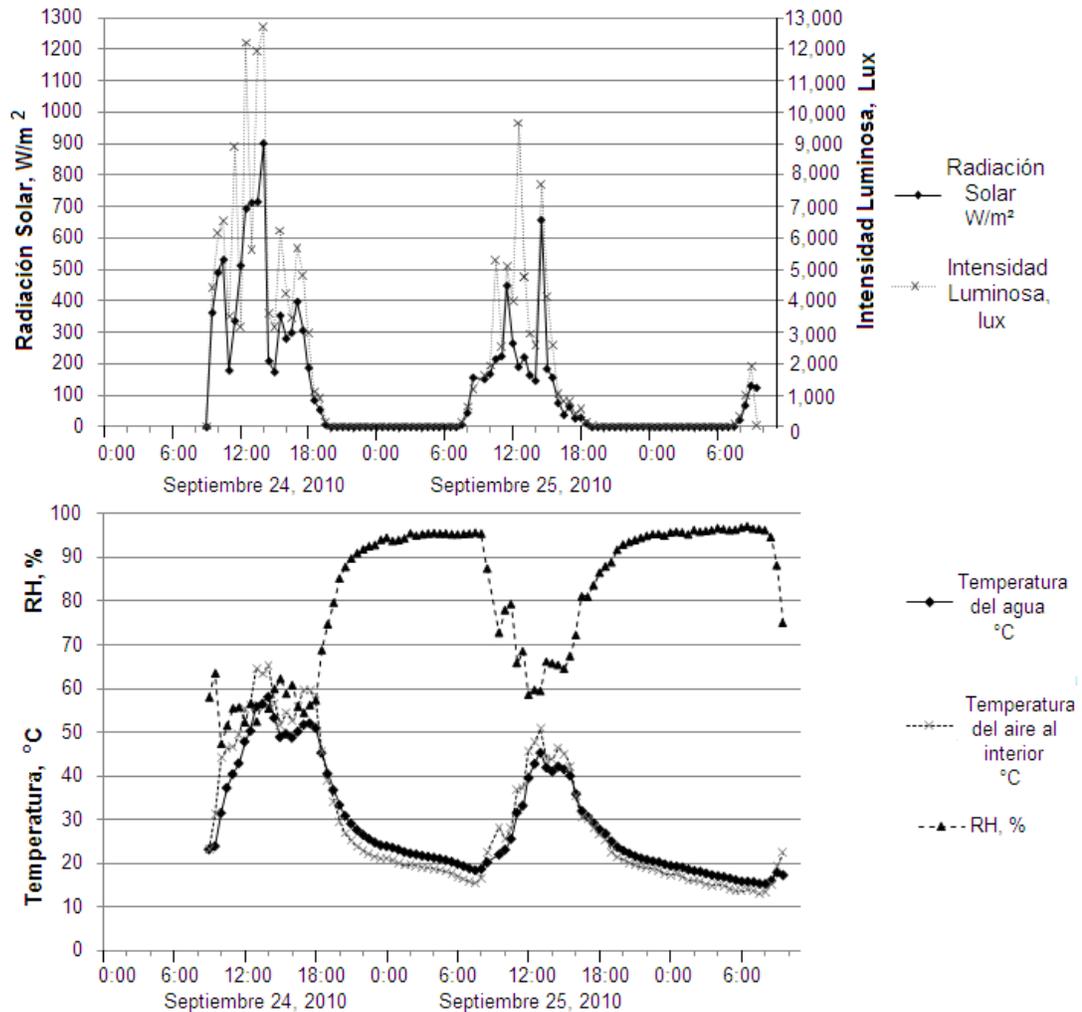


Fig. 6.3. Parámetros meteorológicos medidos en días consecutivos de sol y lluvia, en la Ciudad de México, septiembre de 2010

Por otra parte, parece oportuno aclarar que es difícil correlacionar los tiempos de máxima radiación con máxima temperatura, debido principalmente a la capacidad calorífica del agua que no permite que se incremente la temperatura en forma instantánea y que conserva altas temperaturas aun cuando la radiación solar se haya reducido (ver Fig. 6.3). Por ejemplo, se puede observar en los datos del día 25 de septiembre del 2010, a las 12:00 horas y a las 16:00 horas se registran como picos, los valores máximos de radiación solar y de luminosidad, correspondiendo a muy pequeñas variaciones de temperatura, que no se correlacionan con el fuerte descenso intermedio de radiación solar y luminosidad.

6.2 Desarrollo de un Número Adimensional

Como se estableció en la sección 5.2 del capítulo de Metodología, considerando las variables básicas, se planteó colocarlas, como se señala en el objetivo central, que es la producción de agua destilada en función de la superficie de evapotranspiración. De este modo, en lugar de utilizar el Flux de agua destilada obtenida ($E A_{se}$) en $\text{kg H}_2\text{O m}^{-2}$ de $A_{se} \text{ d}^{-1}$ [$\text{M L}^{-2}\text{t}^{-1}$], se establecen dos términos: el Caudal de agua destilada obtenida (Q_E) $\text{kg H}_2\text{O d}^{-1}$ [M t^{-1}] como variable dependiente, en función del Área superficial expuesta a evaporación (A_{se}) en m^2 [L^2], como la variable independiente.

Para las variable tiempo y temperatura, se consideró utilizar la variable conocida como el *coeficiente de transferencia de calor convectivo* (h_{cv}), medido en $\text{W/m}^2 \text{ K}$, con dimensiones [$\text{M t}^{-3}\text{K}^{-1}$].

De esta forma, la expresión para calcular la producción de agua destilada es:

$$Q_E = f(A_{se}, \Delta T, h_{cv}, C_i)$$

Se aplicó el teorema de Buckingham (Sánchez-Bibriesca, Fuentes-Mariles, 1991), que establece: “Existe un número de parámetros adimensionales independientes fijo para un problema dado, y es igual a la diferencia entre número total de variables menos el número de dimensiones fundamentales.”

Es decir: $I=N-R$

donde:

I:	número de parámetros adimensionales independientes	=	1
N:	número de variables implicadas en el problema	=	5
R:	número de dimensionales fundamentales (Masa, Longitud, Tiempo, Temperatura)	=	4

Determinación de parámetros adimensionales

- La variable se expresa como función exponencial de las 4 restantes:

$$Q_E = A_{se}^a \Delta T^b h_{cv}^c C_i^d$$

- Se obtiene la expresión dimensional equivalente

$$M t^{-1} = (L^2)^a (K)^b (M t^{-3} K^{-1})^c (ML^{-3})^d$$

- Al agrupar los exponentes de la misma base

$$M t^{-1} = (L^{2a-3d}) (K^{b-c}) (M^{c+d}) (t^{-3c})$$

- Formulando el sistema de ecuaciones con base en los exponentes

M	$1 = c+d$	$d = 2/3$
T	$-1 = -3c$	$c = 1/3$
L	$0 = 2a-3d$	$a = 1$
K	$0 = b-c$	$b = 1/3$

- Sustituyendo los resultados:

$$Q_E = A_{se}^1 \Delta T^{\frac{1}{3}} h_{cv}^{\frac{1}{3}} C_i^{\frac{2}{3}}$$

- O visto de otra forma:

$$Q_E = A_{se} \sqrt[3]{\Delta T h_{cv} C_i^2}$$

- Revisando que las dimensiones sean consistentes:

$$M t^{-1} = (L^2) (K)^{\frac{1}{3}} (M t^{-3} K^{-1})^{\frac{1}{3}} (ML^{-3})^{\frac{2}{3}}$$

- El número adimensional encontrado es:

$$N_{VS} = \frac{Q_E}{A_{se} \Delta T^{\frac{1}{3}} h_{cv}^{\frac{1}{3}} C_i^{\frac{2}{3}}}$$

donde el nuevo número adimensional es N_{VS} : *Número de Vega-Silva* y tiene valores entre 1.5×10^{-8} y 1.9×10^{-8} , utilizando unidades del sistema internacional y obteniendo el caudal en $kg d^{-1}$, para condiciones promedio de la Ciudad de México y con concentraciones iniciales de agua entre 1000 y 850 $kg m^{-3}$.

La aplicación del número adimensional N_{VS} : *Número de Vega-Silva* supone diversas ventajas cuando las condiciones óptimas operación se obtengan, ya que facilita la exploración de variables sensibles y operativas. Un ejemplo de ello se puede derivar de la exploración de la sensibilidad a la concentración de sal, preparadas según la Tabla 5.2, para obtener la Figura 6.4.

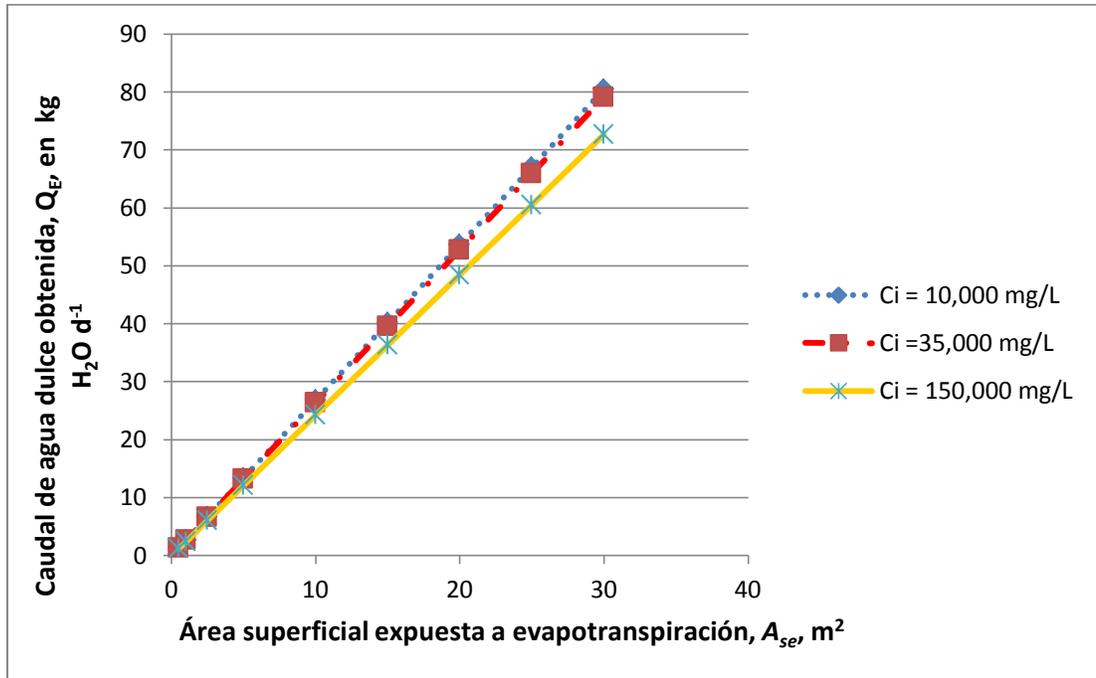


Fig. 6.4 Resultado de la aplicación del parámetro adimensional, considerando diferentes concentraciones de salinidad

Con el parámetro adimensional obtenido, se puede derivar una función capaz de predecir el caudal de agua destilada (Q_E) en kg de agua destilada por segundo conforme el área de la evapotranspiración se incrementa, suponiendo que el coeficiente de transferencia de calor h_{cv} y la diferencia de temperatura ΔT se conservan. Estos resultados se pueden derivar de los datos meteorológicos registrados por las estaciones locales de tiempo de medición. Los resultados de la Figura 6.4, son los típicos de un día normal en el mes de octubre en la Ciudad de México.

El experimento demuestra que si el Área de Evaporación se incrementa, como en el caso de la evapotranspiración en suelo cultivado, donde depende del área superficial

de las hojas y para conocer el caudal evaporado se aplica un *índice de área foliar/área de suelo*, en el caso de un destilador solar con base en evapotranspiración, también será necesario desarrollar un *índice de área de evapotranspiración sobre área de suelo*, aun cuando en lugar de elementos vivos como las hojas se utilicen conjuntos de superficies porosas, que son las telas de algodón, las cuales no presenten los problemas de resistencia a las altas concentraciones de sal. En este trabajo se le denomina como el *índice de área superficial de evapotranspiración/superficie de terreno* (A_{se}/S_t).

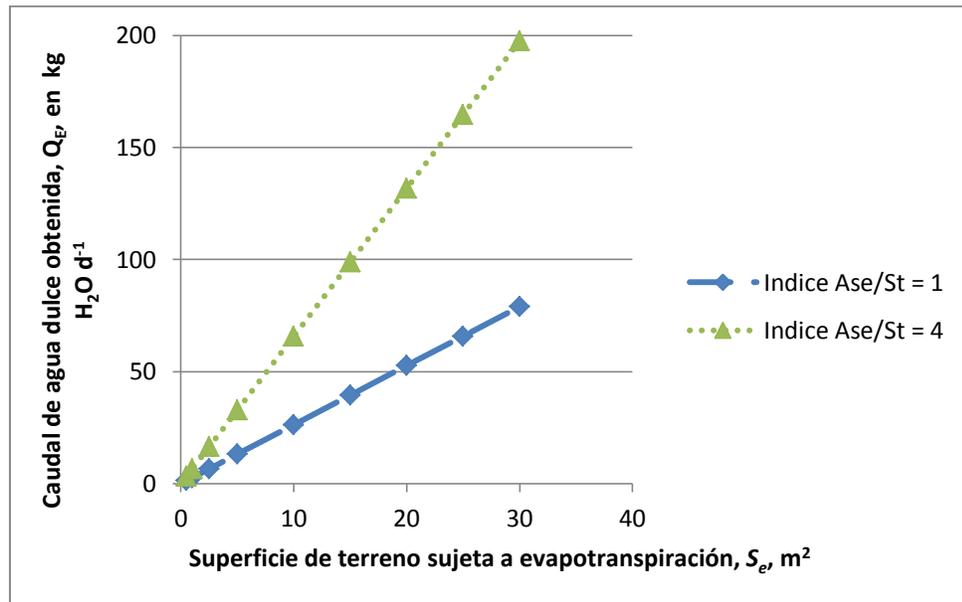


Fig. 6.5 Incremento de producción de agua destilada cuando aumenta el área de evaporación en la misma superficie de terreno

Las pruebas experimentales a nivel laboratorio demuestran que el incremento de caudal evaporado llega a ser 2.5 veces superior cuando el *índice de área superficial de evapotranspiración/superficie de terreno* (A_{se}/S_t) es de 4, como se muestra en la Fig. 6.5.

Del mismo modo, se puede usar el mismo número adimensional, para simular la producción de agua destilada en diferentes condiciones del coeficiente de transferencia de calor h_{cv} , es decir, aplicado a diferentes regiones geográficas que tengan diferentes relaciones de radiación solar con respecto a las condiciones de temperatura externas que den determinadas ΔT . Así, en la Figura 6.6 se muestra la aplicación del número adimensional N_{VS} con dos índices A_{se}/S_t .

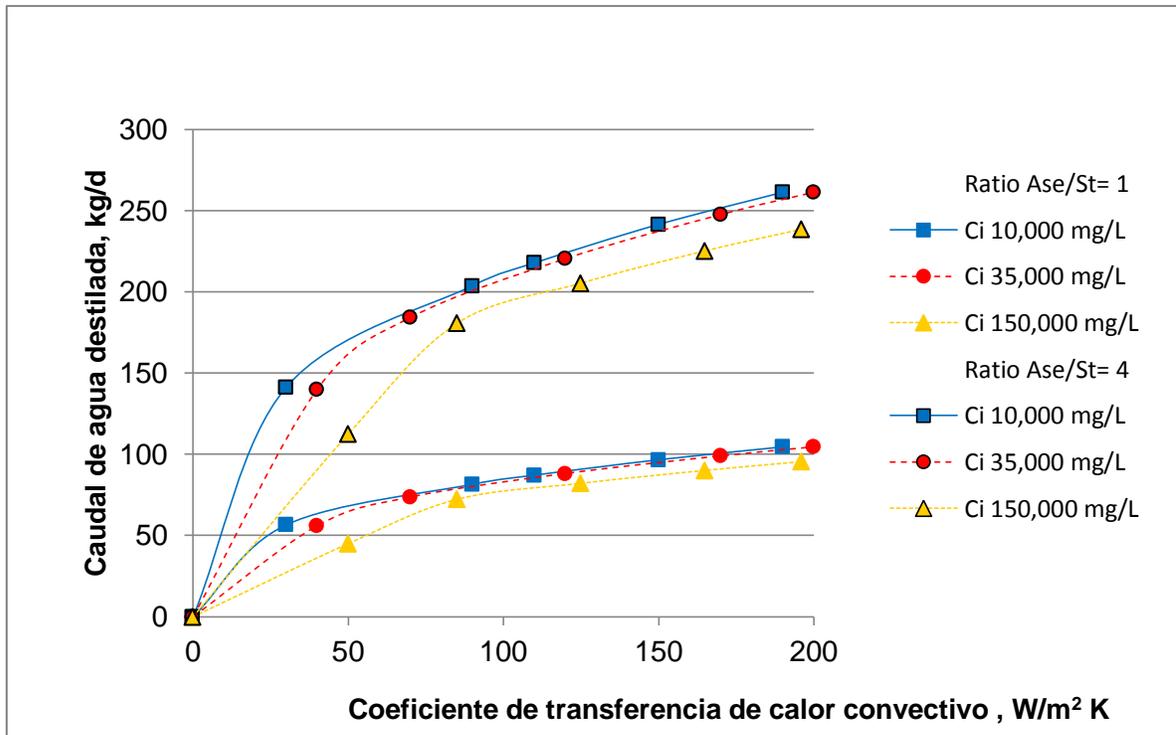


Fig. 6.6 Resultado de la aplicación del parámetro adimensional, en una superficie de 30 m², con diferentes condiciones de radiación solar

Como se mencionó en el capítulo de metodología (sección 5.2), los resultados obtenidos con el número adimensional Vega-Silva N_{VS} , tienen todavía un tratamiento teórico, pues en la unidad experimental tamaño laboratorio sólo fue posible experimentar con y sin una cantidad de tela. Por ello, se desarrollaron pruebas piloto, donde se probó diferentes índices de área superficial de evapotranspiración/superficie de terreno (A_{se}/St) y se establecieron las condiciones en que se vería limitado el incremento en la producción de agua destilada, que no se pretende llegar al infinito en un mismo sistema cerrado.

6.3. Pruebas experimentales piloto en Casetas de Desalinización

Para la determinación de la influencia de área de evapotranspiración en la producción de agua destilada, a fin de optimizar el área de terreno dedicada a la desalinización del agua (objetivo 1.3.3), se desarrollaron los siguientes experimentos en las casetas de desalinización con base en energía solar.

6.3.1 Resultados del Experimento 1: Verificación de semejanza en las respuestas de las Casetas A y B

Para corroborar que las unidades experimentales operan en forma semejante y pueden ser contrastadas se aplicó el Diseño experimental: *Comparación de medias simple* $\mu_{CA} \neq \mu_{CB}$, utilizando la Distribución *t-Student*.

A continuación, (Tabla 6.2) se presentan los resultados de agua destilada, en mL d⁻¹

TABLA 6.2 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO DE COMPARACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CASETAS DE DESALINIZACIÓN A Y B

Ensayo	Caseta A	Caseta B
1	150	140
2	190	175
3	1080	880
4	1050	960
5	680	590
6	1040	1020
promedio, \bar{y}	698.3	627.5
Promedio General \bar{y}	662.9	

Se puede observar que hay una pequeña diferencia entre los valores obtenidos en la Caseta A y la Caseta B, aparentemente hay mayor producción de agua destilada en la Caseta A. Para verificar que las diferencias fueran significativas, se realizó el cálculo de varianza, utilizando la suma de cuadrados de las diferencias de cada resultado con la media general y como Estadístico de Prueba, t_0 se utilizó como Método de Comparación de Medias Simples utilizando la Distribución de t-Student (Anexo 2).

El valor crítico obtenido de la Distribución t-Student con $n=10$ grados de libertad y 95% de confianza ($\alpha/2$) es de 2.228. Por ser menor el estadístico de prueba de comparación de medias t_0 , 0.121 que el valor crítico de la Distribución t-Student, 2.228 (Anexo 2), **se acepta la Hipótesis Nula**, que considera que las medias de la producción de agua destilada de la caseta A y de la caseta B corresponden a la misma población y, por tanto, no hay diferencias significativas en el comportamiento de las dos casetas bajo las mismas condiciones meteorológicas durante el mismo ensayo y a pesar de las variaciones de días diferentes.

6.3.2 Resultados del Experimento 2:

Evaluación de la capacidad de producción de agua destilada al incrementar el área de evapotranspiración aplicando superficies porosas (tela de algodón)

Como se estableció en la Hipótesis del presente Trabajo Doctoral, se desea probar que habrá un incremento en la producción de agua destilada al aumentar el área de evaporación utilizando telas que incrementen el área por el proceso de evapotranspiración. Para ello, se aplicaron los niveles establecidos en la metodología en la caseta A, mientras que la caseta B sirvió de testigo.

Para facilitar el análisis de resultados, se presenta, la producción bruta de agua destilada producto de los tratamientos, independientemente de las condiciones meteorológicas del día de cada ensayo.

TABLA 6.3 PRODUCCIÓN BRUTA DE AGUA DESTILADA (mL día^{-1}) APLICANDO LOS NIVELES DE TRATAMIENTO

Ensayo	k : Área de evaporación + área de evapotranspiración, [m^2]				
	1.5	3.9	6.3	8.7	11.1
1	150	340	2380	1880	600
2	190	540	3420	2920	1020
3	1080	840	1500	1000	1100
4	1050	1500	1600	1000	890
5	680	700	1400	1000	840
6	1040	1100	1200	700	880
7	960	700	1500	1000	1240
8	175	1100	3200	1100	1360
promedio, \bar{y}_k	665.6	852.5	2,025.0	1,325.0	991.3
Promedio, \bar{Y}	1,171.9				

Se realizó un Análisis de Varianza a los resultados, para verificar que las diferencias fueran significativas (Anexo 2), encontrando que el siguiente valor de F experimental.

TABLA 6.4. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) RESPECTO A PRODUCCIÓN BRUTA DE AGUA DESTILADA

Fuente de variación	G.L.	SS	MS	F
<i>Entre tratamientos</i>	4	9,137,475	2,284,369	3.94
Error	35	11,608,709	580,435	
Total	39	20,746,184.4		

Como el valor de F obtenido experimentalmente $3.94 > 2.65$ que es el valor crítico para un nivel de significancia, α del 5%, se rechaza la Hipótesis Nula, significa que existen diferencias significativas entre tratamientos, es decir, que el área de evapotranspiración agregada al área de evaporación tiene influencia en la producción de agua destilada.

y se acepta la:

Hipótesis Alternativa: La producción de agua destilada de la caseta A se incrementará con el aumento del área de evapotranspiración que se logra al incorporar superficies porosas verticales (telas) en contacto con las canaletas receptoras de agua salina (área de evaporación).

Se desarrollaron los análisis de varianza por parejas, a fin de encontrar aquellos niveles de tratamiento que tuvieran diferencias significativas, comparadas con el nivel de máxima producción de agua destilada, que fue el nivel 2, con área de 6.3 m^2 y un índice Ase/St de 4.2 (Anexo 2).

6.3.3 Resultados del Experimento 3:

Evaluación de las concentraciones en la producción de agua destilada y en la salmuera con la mejor área de evapotranspiración

Una vez seleccionada la mejor área de evapotranspiración, con un Índice Ase/St de 4.2, se realizaron los ensayos para evaluar los resultados de concentración de sales, tanto en agua destilada como en salmuera, con el propósito de verificar que el agua producida cumpliera el nivel permisible para su uso como agua potable y conocer el resultado de concentración en la salmuera, que se muestran en la Tabla 6.5.

TABLA 6.5 RESULTADOS PROMEDIO DE CONCENTRACIÓN DE SALES

Concentración de Sales, mg/L		
Inicial	Agua destilada	Salmuera
10,000	25	20,000
35,000	60	60,000
150,000	450	310,000

Como se puede observar, la concentración de sales en el destilado se incrementa conforme aumenta la concentración inicial del agua, como se estableció en el Número Adimensional Vega-Silva, y todavía se conservan por debajo del límite permisible de sólidos disueltos en agua potable, que establece 1000 mg L^{-1} , conforme la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000). Aunque no se realizaron ensayos con mayor concentración, es previsible que a concentraciones mayores de los $150,000 \text{ mg L}^{-1}$ la concentración en sólidos disueltos rebasara la norma.

También se observa que la salmuera alcanza concentraciones cercanas al doble que la concentración de agua inicial, que en algunas condiciones, todavía es susceptible de seguir destilando para obtener más destilado e incrementar la salinidad de la salmuera, que, en valores de $350,000 \text{ mg L}^{-1}$ llega a la saturación, que se considera $360,000 \text{ mg}$ de cloruro de sodio en 1000 mL de agua a 20°C (Chang, 1999). En la Figura 6.7 se muestran los efectos de la saturación en la formación de cristales de sal.

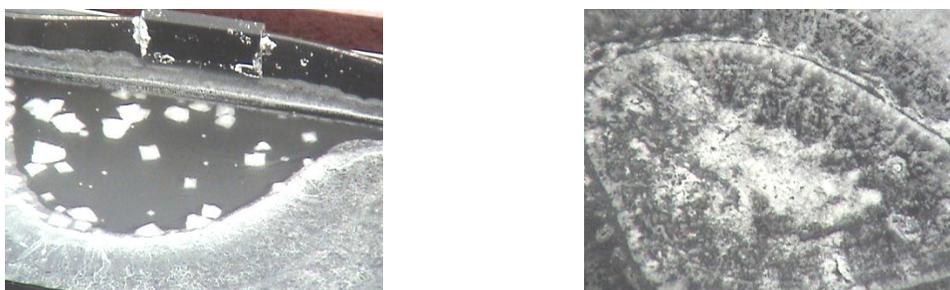


Fig. 6.7 Formación de cristales en salmueras de alta concentración

6.4 *Discusión de Resultados*

1. En el experimento 1 se comprueba que no hay diferencias significativas entre los resultados de producción de agua destilada entre Caseta A y B, más allá del azar, demostrando que corresponden a la misma población.

Ello permitió el análisis del tratamiento, en producción bruta de agua, considerando que en cada día las condiciones meteorológicas cambian y se amplía las diferencias entre producción de agua ocasionada por variables ajenas al tratamiento (radiación solar, duración de horas-sol, temperatura, viento, humedad relativa, etc.).

Además, se comparó el análisis desde el punto de vista de incrementos de producción de agua destilada entre la Caseta A con tratamiento (incremento de área de evapotranspiración) y la Caseta B sin tratamiento.

2. En el experimento 2 se probaron los tratamientos.

El análisis de varianza ANOVA permite comprobar que sí existen diferencias significativas con los diferentes tratamientos, es decir, con las diferentes áreas de evapotranspiración. Sin embargo, no resulta en un incremento lineal y positivo como se planteó en la hipótesis del trabajo, por lo que se realizaron análisis de varianza comparando los diferentes tratamientos (Tabla 6.6) encontrando:

TABLA 6.6 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE SIGNIFICANCIA POR PAREJAS

Nivel	Suma de áreas	Índice Ase/St*	Resultados de pruebas por pareja
0	1.5 m ²	1	Si tiene influencia en la producción de agua destilada
1	3.9 m ²	2.6	Si tiene influencia en la producción de agua destilada.
2	6.3 m ²	4.2	Máxima producción de agua destilada
3	8.7 m ²	5.8	No tiene diferencia o influencia en la producción de agua destilada con respecto al nivel 2.
4	11.1 m ²	7.4	Si tiene influencia en la producción de agua destilada, aunque en un sentido inverso al esperado, dado que la mayor área produce el menor caudal de agua destilada

- El promedio más alto 2025 ml de agua destilada, corresponde al tratamiento con la suma de áreas de 6.3 m² (nivel 2, *índice Ase/St* de 4.2). Este promedio es significativamente mayor a todos excepto al del nivel 3, correspondiente a 8.7 m² e índice de 5.8, que produjo 1325 ml de agua, como promedio.
- Cuando se analiza con respecto a los niveles 0 y 1, con áreas de 1.5 y 3.9 m², sí se encuentran diferencias significativas en forma gradual y positiva, es decir, se acepta la Hipótesis al corroborar que, conforme se incrementa el área de evapotranspiración, hay un incremento en la producción de agua destilada, desde el nivel 0 hasta el 2, el cual ya no presentó diferencias significativas con el nivel 3.
- El análisis ANOVA comparando las áreas anteriores de 6.3 y 8.7 m² no muestran diferencias significativas entre sí, es decir la producción promedio utilizando áreas entre 6.3 y 8.7 m² (*índice Ase/St* de 4.2 y 5.8) producirán cantidades de agua destilada semejantes y correspondientes a la misma población.
- El tratamiento (nivel 4,) con la mayor área de evapotranspiración de 11.1 m², y con *índice Ase/St* de 7.4, sí difiere significativamente de los dos de área menor (6.3 y 8.7 m²), pero no hay un incremento sino un decremento en la producción de agua destilada. Esto pudo corroborarse desde el desarrollo de los ensayos, ya que consistentemente se producía una sombra entre las superficies expuestas a evapotranspiración que evitaba la distribución de la radiación solar y con ello el incremento de la temperatura en el proceso de evaporación. Las sombras también afectaron la temperatura de agua en las canaletas que fueron sensiblemente menores en estos ensayos (*Fig. 6.8*).

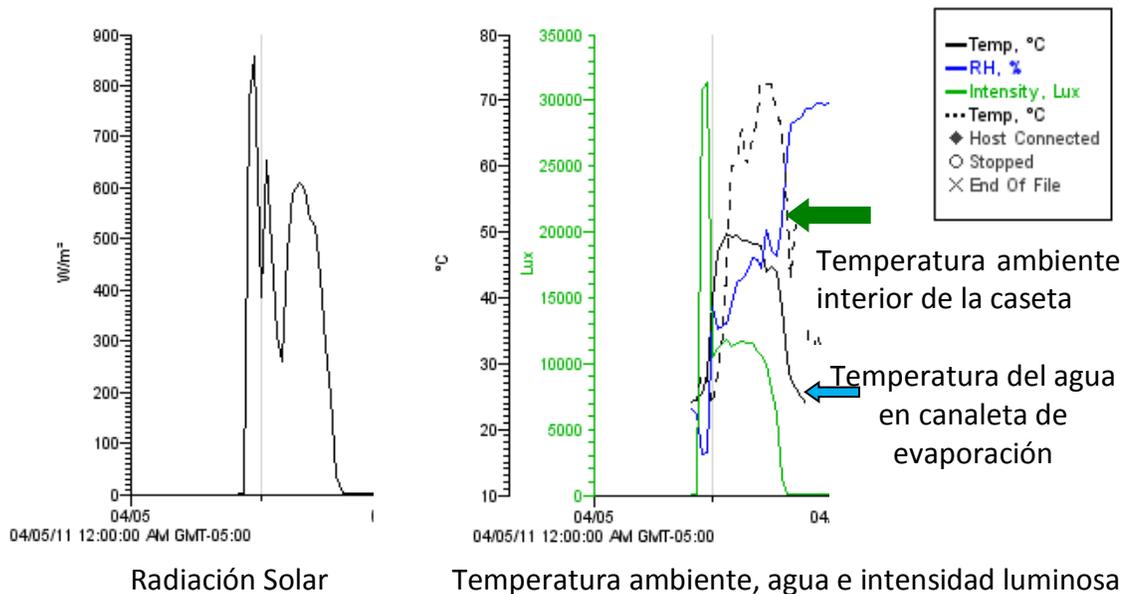


Fig. 6.8 Reducción de temperatura en agua por efecto de sombreado en nivel 4.

Se puede observar tanto en los resultados numéricos de la Tabla 6.3 como al graficar los resultados en la Figura 6.9, que el incremento de producción de agua destilada con respecto al incremento de área de evapotranspiración es sostenido en los primeros puntos y que llega a un límite, ocasionado por el efecto de sombreado de unas telas sobre otras, sin embargo es superior a los reportados en invernaderos de Tunes por Chaibi (2000) y de España por García Marí *et al.* (2007), cuya producción se encontraba en el intervalo de 400 a 1000 mL d⁻¹.

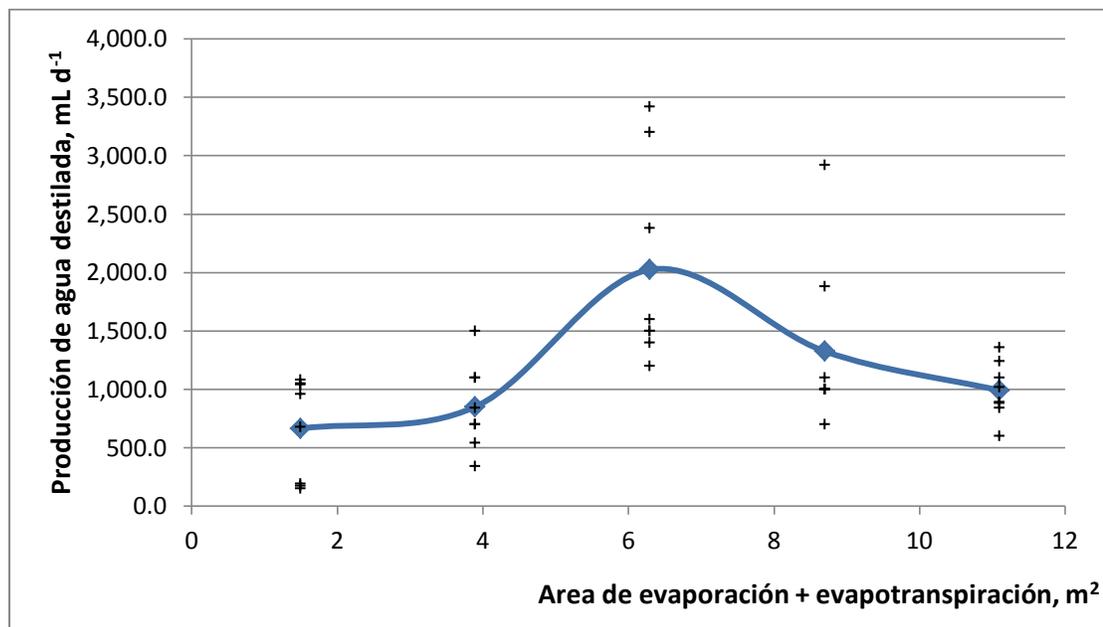


Fig. 6.9 Representación esquemática de los resultados del diseño de experimentos

Es notable que la menor variabilidad de la producción de agua destilada se produzca en los extremos, cuando no hay elementos de evapotranspiración y se tiene solo la superficie de evaporación y cuando fue mayor el área de evapotranspiración con mayor efecto de sombreado (Fig. 6.8). Y que los mayores caudales fueron obtenidos en las mejores condiciones, no solo de área de evapotranspiración, sino de las otras condiciones meteorológicas, manifestadas en la radiación solar y las diferencias de temperatura alcanzadas.

- La concentración de sales en el destilado se incrementa conforme aumenta la concentración inicial del agua, como se estableció en el Número Adimensional Vega-Silva, y hasta salmueras con 150,000 mg L⁻¹ de sales, el destilado se conserva por debajo del límite permisible de sólidos disueltos en agua potable, que establece 1000 mg L⁻¹.

De esta manera, el uso del Número Adimensional de *Vega-Silva* N_{VS} , sirve para los propósitos de exploración de variables operativas, tales, como concentración de sales, radiación solar, diferencias de temperatura, coeficientes de transferencia de calor convectivo y superficie de terreno, quedando limitado a relaciones de *Índices de Área Superficial de Evapotranspiración/Superficie de terreno* (Ase/St) máximos de 6, pues los resultados son afectados por el efecto de sombreado en índices superiores y se pierden las ventajas de método de evapotranspiración en la destilación solar.

Además, es posible incorporar a resultados de modelos que consideran otros elementos, como la evapotranspiración activa, utilizando los elementos proporcionados por Tiwari, Dimri, Chel (2009), Tsilingiris (2010), Tanaka (2011), Kabeel, El-Agouz (2011) como destilación activa y el uso de condensadores independientes del invernadero que los autores Marmouch *et al.* (2009), Sethi, Dubey (2011) han demostrado que incrementa sustancialmente la producción de agua destilada.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente investigación permitió comprobar la hipótesis de trabajo, estableciendo que el proceso de evapotranspiración puede ser reproducido físicamente en un sistema de destilación solar para el mejoramiento de la calidad del aguas salinas y salobres, hasta producir agua potable. Los resultados encontrados en el modelo experimental son muy alentadores y consistentes con el modelo matemático desarrollado, logrando un incremento promedio de 285% en producción de agua destilada al día, con un incremento mínimo de 175% y con un máximo del 500%.

Se espera una importante aplicación en zonas rurales con limitaciones en suministro de agua, de energía, de terrenos desocupados y que se encuentren en zonas ribereñas, en acuíferos salobres o contaminados por metales.

7.1 Conclusiones

En forma particular, las conclusiones del estudio son:

1. Se logró desarrollar el proceso de evapotranspiración dentro de un sistema de destilación solar, aplicado en un dispositivo piloto de pruebas experimentales, utilizando un sistema de absorción, conducción capilar y proporcionando superficie de evaporación con base en un sistema de telas.
2. Con el uso del número adimensional N_{VS} : *Número de Vega-Silva*, es posible incorporar un nuevo parámetro en las ecuaciones de Destilación Solar la concentración de agua en la disolución, que tiene sus aplicaciones principales en el manejo de salmueras en lagunas de evaporación y, además, desglosar el concepto de área en dos partes: superficie de terreno y superficie de evaporación.
3. El modelo experimental nivel laboratorio demostró, a su vez, que es posible incrementar el área de evaporación utilizando superficies porosas en la misma superficie de terreno y lograr incrementar la producción de agua destilada 2.5 veces cuando el Índice de Área Superficial de Evapotranspiración/Superficie de terreno (A_{se}/St) es de 4.
4. No se encontraron diferencias significativas entre los resultados de producción de agua destilada entre las caseta de desalinización nivel piloto, más allá del azar, demostrando que corresponden a la misma población. Ello permitió proponer el análisis del tratamiento, en producción bruta de agua, a pesar de que, en cada día, las condiciones meteorológicas cambian y se amplía las diferencias entre producción de agua ocasionada por variables ajenas al tratamiento (radiación solar, duración de horas-sol, temperatura, viento, humedad relativa, etc.).

5. La experimentación en las Casetas de Desalinización permitió probar que sí existen diferencias significativas con las diferentes áreas de evapotranspiración, mediante el análisis de varianza ANOVA. Sin embargo, no resulta en un incremento lineal y positivo como se planteó en la hipótesis del trabajo.
6. Existe un incremento sostenido hasta los 6 m² de área de evapotranspiración, donde el índice Ase/St de 4.2, a partir de este valor se mantiene la producción de agua con el incremento de área hasta 8.5 m² hasta un índice de 5.8 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.
7. Es notable que la menor variabilidad de la producción de agua destilada se produzca en los extremos, cuando no hay elementos de evapotranspiración y se tiene solo la superficie de evaporación y cuando fue mayor el área de evapotranspiración con mayor efecto de sombreado. Y que los mayores caudales fueron obtenidos en las mejores condiciones, no solo de área de evapotranspiración, sino de las otras condiciones meteorológicas, manifestadas en la radiación solar y las diferencias de temperatura alcanzadas.
8. La concentración de sales en el destilado se incrementa conforme aumenta la concentración inicial del agua, como se estableció en el número adimensional *Vega-Silva*, y hasta salmueras con 150,000 mg L⁻¹ de sales, el destilado se conserva por debajo del límite permisible de sólidos disueltos en agua potable, que establece 1000 mg L⁻¹.
9. De esta manera, el uso del número adimensional de *Vega-Silva* N_{VS} , sirve para los propósitos de exploración de variables operativas, tales, como concentración de sales, radiación solar, diferencias de temperatura, coeficientes de transferencia de calor convectivo y superficie de terreno, quedando limitado a relaciones de *índices de área superficial de evapotranspiración/superficie de terreno (Ase/St)* máximos de 6, pues los resultados son afectados por el efecto de sombreado en índices superiores y se pierden las ventajas de método de evapotranspiración en la destilación solar.

7.2 Recomendaciones

Todavía resultará necesaria mucha investigación para definir el comportamiento de este nuevo sistema y obtener información sobre su aplicación para el mejoramiento de la calidad del agua mediante evapotranspiración y destilación solar.

En forma particular se recomienda:

1. Establecer los límites de ocupación eficiente del volumen del destilador solar. Es conveniente determinar las alturas hasta las cuales el proceso de evapotranspiración continua funcionando con un sistema físico.
2. Realizar pruebas con diferentes materiales porosos, con diferentes diámetros de poro y con diferentes arreglos espaciales, en particular, comparando el arreglo de velas de barco contra la estructura de un árbol.
3. Determinar los valores del número adimensional de *Vega-Silva* N_{VS} en diferentes regiones geográficas, para obtener los valores donde, por el caudal obtenido, es conveniente la aplicación del proceso de destilación solar y en cuales condiciones su aplicación es limitada.
4. Probar diferentes materiales de construcción de las casetas de desalinización y realizar comparaciones técnico-económicas de su aplicación.
5. Probar el sistema con agua salina y salobre de distintas procedencias y calidades.

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, ISBN 92-5-304219-2, Roma, Italia, 323 pp

AMTA (*American Membrane Technology Association*), (2007), *Membrane Desalination Costs* http://www.membranes-amta.org/amta_media/pdfs/6_MembraneDesalinationCosts.pdf

Andersen, Peter (2001), "Water Purification Device", Patent No. US 6,274,004 B, Aug. 14, 2001.

Arreguín Cortés, Felipe I. y Martín Domínguez, Alejandra (2000). Desalinización del Agua, *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XV, No 1, enero-abril, pp 27-49.

ASHRAE Handbook (1981) "Fundamentals" American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA

Atwell, George (1985), "Desalination system", Patent US 4,536, 257, August 20, 1985.

Barba, Diego, Concari Franco, Spizzichino Giancarlo, (1976) "Thermocompression-type apparatus for desalting saline water". Patent US 3,997,408, Dec 14, 1976.

Benli, Hüseyin, Durmis Aydin (2009) "Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new design solar collectors in greenhouse" *Solar Energy*, Vol 83 (2009) pags 2109-2119.

Bermúdez-Contreras, Alfredo, Murray Thomson, David G. Infield. (2008) Renewable energy powered desalination in Baja California Sur, Mexico. *Desalination* 220 (2008) 431–440

Blanquer, David (2004). Público y privado en el régimen jurídico de la desalación del agua, *Actualidad Jurídica (Uría & Menéndez)*, Núm. 9, pp 35-52, Septiembre 2004. Enlazado como <http://libros-revistas-derecho.vlex.es/vid/publico-privado-juridico-desalacion-agua-256408>.

Borgren, Peter M. (1991) Low-pressure desalination device. Patent number: 5,064,505 Nov 12, 1991.

Borgren, Peter M. (1993) Low-pressure desalination device. Patent number: 5,198,076 Mar 30, 1993.

Bosley, Kenneth R. (2002) Seawater pressure-driven desalination apparatus with gravity-driven. Patent number: US 6,348,148 B1 Feb 19, 2002.

Carter, M.R., and B.C. Ball. (1993). Soil sampling and methods of analysis. Chapter 54. *Soil Porosity*. (Ed. M. Carter) Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers.USA. 823 pp.

Chaibi, (2000) Analysis by simulation of a solar still integrated in a greenhouse roof *Desalination* 128 (2000) 123-138.

Chang, Raymond (1999) *Química*, Ed Mc Graw Hill, 6a Edición, México

Chargoy del Valle, Norberto y Fernández Zayas, José Luis (2010), “Destilación solar del agua en México, 1983 a 2003” ISBN 978-607-02-1587-2, *Serie Investigación y Desarrollo SID 664* Julio 2010, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, ISBN 970-32-0196-2

Cipollina, Andrea, Micale, Giorgio and Rizzuti, Lucio (2009) *Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Process*, Ed Springer ISBN 978-3-642-01149-8, e-ISBN 978-3-642-01150-4.

CONAGUA (2008a) Capítulo 1: Contexto Geográfico y Socioeconómico, *Estadísticas del Agua en México 2008*, Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), Editor Comisión Nacional del Agua, México.

CONAGUA (2008b) Capítulo 2: Situación de los recursos hídricos, *Estadísticas del Agua en México 2008*. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), Editor Comisión Nacional del Agua, México.

CONAGUA (2008c) *Programa Nacional Hídrico 2007-2012*, Comisión Nacional del Agua, Editor SEMARNAT, México.

Davies, PA. (2011) A solar-powered reverse osmosis system for high recovery of freshwater from saline groundwater, *Desalination*, Vol. 271, pp 72–79

Davies, P.A. and Paton, C. (2005) The Seawater Greenhouse in the United Arab Emirates: thermal modelling and evaluation of design options, *Desalination*, Vol. 173, pp 103-111

Feilizadeh, M., Soltanieh, M., Jafarpur, K., Karimi Estahbanati, M.R. (2010) A new radiation model for a single-slope solar still, *Desalination*, 262 (2010) 166–173.

Fernández Hinojosa, Gladys y Johnston Barria, Myrna (1986) “*Fisiología Vegetal Experimental*”, Servicio Editorial IICA, Serie Libros y Materiales Educativos No. 58, San José de Costa Rica ISBN-92-9039-066-2.

García Marí, Eugenio, Gutiérrez Colomer, Rosa Penélope, Blaise-Ombrecht, Carlos Adrados (2007) Performance analysis of a solar still integrated in a greenhouse, *Desalination*, 203 (2007) 435-443.

Gnaneswar Gude, Veera; Nirmalakhandan, Nagamany (2008) Desalination Using Low-Grade Heat Sources *Journal of Energy Engineering*, Vol. 134, No. 3, pags. 95-101

Gamarra, Michael (2007) "El agua nuestra de cada día, dádnosla hoy", *Hontanar digital*, Abril 2007, Núm. 97, pág. 2Australia,
http://www.cervantespublishing.com/Hontanar/2007/Hontanar_abril_2007.pdf

Hay, Harold R. (1977). "Process and apparatus for solar distillation". US Patent No. 4,055,473, Oct. 25, 1977.

Huseiney, Abdo A. and Lundstron, Jerry E. (1995) Freezing purification system and method for decontamination and desalination of water, Patent US 5,400, 619, Mar. 28, 1995.

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

Kalogirou, Soteris A. (2005) "Seawater desalination using renewable energy sources", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 31, pp. 242–281

Kamiya, Ichiro, Yuzo Narasaki, Tetsuo Kuroda (2004), Desalination method and desalination apparatus, *Patent No. US 6,833,056 B1*, Dec 21, 2004.

Klausner, James, F. MEI, Renwei , 2006, Air heated diffusion driven water purification system. Patente: WO2006138516 A2, Dic 28, 2006.

Kozai, T., Hayashi, M., Suzuki, H. and Watanabe, L. (1982) "Effect of environmental factors on evapotranspiration of greenhouse cucumber crops in hydroponic cultura" *Journal Agricultural Meteorology* 38 (2): 153-159

Kumar, Shiv y Tiwari, G.N. (2009). "Estimation of internal heat transfer coefficients of a hybrid (PV/T) active solar still". *Solar Energy* 83 1656–1667

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/097/htm/sec_10.htm
Mayo 2009

<http://www.usm.edu/polymer/> (2009). Página de The University of Southern Mississippi's School of Polymers and High Performance Materials, junio 2010.

<http://www.geologia.uson.mx/academicos/lvega/ARCHIVOS/ARCHIVOS/EVAP.htm> (2011)
Página de la Universidad de Sonora, profesor L. Vega, 4 de abril de 2011.

Lechuga A., Jorge, Maricela Rodríguez y Joaquim Lloveras M. (2007). Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnológica. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 11-3, pp. 5-14, ISSN: 1665-529X

Li, Nan, Fang Yin, Wence Sun, Caihong Zhang, Yufeng Shi "Turbidity study of solar ponds utilizing seawater as salt source" (2010), *Solar Energy* 84 289–295

Lindblom, Jenny and Nordell, Bo (2007) Underground condensation of humid air for drinking water production and subsurface irrigation, *Desalination* 203 (2007) 417-434

Loomis R.S. y Connor D.J. 1992. *Crop Ecology*. Ed. Cambridge University Press

Marmouch, Hichem; Orfi, Jamel; Ben Nasrallah, Sassi (2009) Effect of a cooling tower on a solar desalination system, *Desalination*, Volumen 238 páginas 281-289

Meinel, Aden .B. y Meinel, Marjorie Pettit (1982) *Aplicaciones de la Energía Solar*, Ed. Reverté, España.

Martin de Santa Olalla Mañas, F., López Fuster, P., Calera Belmonte, A., 2005 *Agua y Agronomía*, Ediciones Mundi-Prensa, S.A. (Con la universidad de Castilla-La Mancha) Madrid España.

Martínez Pereda, Pedro, Silva Martínez, Ana Elisa, Vega González. Eduardo, García Villegas, Beatriz, Antonio Antonio, Mónica y Guzmán Tristán, Judith Esmeralda "Perspectivas y requerimiento de desalinización del agua en México para enfrentar problemas de escasez de agua en zonas áridas y semiáridas del país." en memorias del *XXXII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental: El cumplimiento de las metas del milenio en la búsqueda de la universalización de los servicios*. Bávaro-Punta Cana República Dominicana, 7 al 11 de Noviembre de 2010

National Geographic Magazine, (2010, Abril) dedicado a: *Water: Our Thirsty World*, artículo de Karen E. Lange: *The Big Idea: Get the Salt Out*, pp 45-46.

Nelson, H. E. (1972) Evaporation-reverse osmosis water desalination system, *Patent* number US 3,632,505. Jan 4, 1972.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, modificación publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el día 22 de noviembre del 2000.

Palacios Vélez Enrique (1981) *“Introducción a la teoría de operación de distritos y sistemas de riego”*, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

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

ONU, 2010, Agua para todos, Agua para la vida: *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo*, MDG Report 2010 Es 20100612 r9.indd 3, 6/15/2010 12:58:23 PM

Ortiz-Villanueva, Bonifacio y Ortiz Solorio, Carlos Alberto (1990) *“Edafología”*, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, México, ISBN-968-884-090-4, 394 pp.

Raven, Ray F., Evert, Peter H and Eichhorn, Susan E. (1992) *“Biología de las plantas, Volumen 2”*, Ed. Reverté, S.A., ISBN-84-291-1842-X Tomo II, Barcelona, España.

Richards, L.A. (1954) *“Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos”*, *Manual de agricultura No. 60*, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, traducida por México, Editorial Cultura.

Rubio Cerda, Eduardo y Fernández Zayas, José Luis (2005). Estudio experimental de un destilador solar orientable de gran tamaño. SSDA 11- 05.
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/rubiocerda.pdf>

Rubio Cerda, Eduardo, Fernández Zayas, J.L. and Porta-Gándara, M.A. (2004) *“Modeling thermal asymetries in double slope solar stills”*. *Renewable Energy*, Vol. 29 págs. 895-906.

Salah, Abdallah, Mazen M Abu-Khader, Omar Badran *“Effect of various absorbing materials on the termal performance of solar stills”*. *Desalination*, 242 (2009) 128-137

Sánchez Bibriesca, José Luis y Fuentes Mariles, Oscar Arturo (1991) Problemas de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, *Series del Instituto de Ingeniería*, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 39 a 54, México.

Seginer, Ido (1984) *“On the night transpiration of Greenhouse Roses under glass or plastic cover”* *Agricultural Meteorology*, 30 (1984) 257-268

Singw, A.K. Tiwari, G.N. Sharma, P.B. Khan, Emran (1995) Optimization of orientation for higher yield of solar still for a given location, *Ener. Convers. Manag.* 36 (1995) 175–187

Spiegler, K.S. (1977) *Salt-Water Purification*, 2° Edition, Ed Plenum Press, New York, USA.

Tanaka Hiroshi "Effect of inclination of external reflector of basin type still in summer" *Desalination*, 242 (2009) 205-214.

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.

Telkes, Maria (1959a). New and Improved Methods for Lower Cost Solar Distillation, New York University, *Saline Water Research and Development Progress Report No. 31*. Unites States, Department of Interior, Office of Saline Water.

Telkes, Maria (1959b). Solar Still Construction, New York University, under contracts No. 14-01-001-68 and 102. *Research and Development Progress Report No. 33*. Unites States, Department of Interior, Office of Saline Water.

Tiwari, G. Dimri, V., Chil, A (2009) Parametric study of an active and passive solar distillation system: Energy and exergy analysis. *Desalination*, 242 (2009) 1-18

Tiwari, G.N. Thomas, J.M., Khan, Emran (1994) Optimisation of glass cover inclination for maximum yield in a solar still, *Heat Recov. Sys. CHP 14* (1994) 447–455.

Tsilingiris, P.T. (2010) Modeling heat and mass transport phenomena at higher temperaturas in solar distillation systems – The Chilton–Colburn analogy *Solar Energy* 84 (2010) 308–317

UNESCO, 2003, Agua para todos, Agua para la vida: *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo*, Secretaría UNESCO, Division of Water Sciences, UNESCO/Mundi-Prensa Libros, 2003 para la edición española http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/ex_summary/ex_summary_es.pdf

U.S. Office of Saline Water (1958). "Saline Water Conversion", *Proceedings of a Symposium*, 4-6 November 1957, sponsored by National Academy of Sciences and U.S. Department of the Interior. Publication 568, Washington, D.C.

U.S. Office of Saline Water (1965). "Solar Distillation: A Review of the Batellette Experience". *Proceedings of the First International Symposium on Water Desalination* Washington, D.C. October 3-9, 1965, U.S. Department of the Interior.

Vega González, Eduardo (2008) Efectos de los cambios de presión sobre la polarización y deposición de partículas en un sistema de ultrafiltración, *Tesis de Doctorado*, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Voutchkov, Nikolay (2005) "Desalination System US Patent 2005/0236309A Oct 27, 2005

Weinberger, Joseoh, Uriyel Fisher, Gad Assaf, Benjamin Doron (1996) "Method of and means for water desalination", US Patent 5,582,690, Dec. 10, 1996.

ANEXO ANÁLISIS DE VARIANZA EN RESULTADOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES EN CASETAS DE DESALINIZACIÓN

A.1 Resultados del Experimento 1: Verificación de semejanza en las respuestas de las Casetas A y B

Se presentaron los resultados de agua destilada, en mL, para su análisis:

TABLA A.1 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO DE COMPARACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CASETAS DE DESALINIZACIÓN A Y B

Ensayo	Caseta A	Caseta B
1	150	140
2	190	175
3	1080	880
4	1050	960
5	680	590
6	1040	1020
promedio, \bar{y}	698.3	627.5
Promedio General \bar{y}	662.9	

$$\bar{y} = \frac{\sum y}{n}$$

Se puede observar que hay una pequeña diferencia entre los valores obtenidos en la caseta A y la caseta B, aparentemente hay mayor producción de agua destilada en la caseta A. Para verificar que las diferencias fueran significativas, se realizó el cálculo de varianza, utilizando la suma de cuadrados de las diferencias de cada resultado con la media general:

TABLA A.2 SUMAS DE CUADRADOS PARA EL CÁLCULO DE VARIANZA EN EL EXPERIMENTO 1

Ensayo	Caseta A	Caseta B
1	300,669.4	237,656.3
2	258,402.8	204,756.3
3	145,669.4	63,756.3
4	123,669.4	110,556.3
5	336.1	1,406.3
6	116,736.1	154,056.3
Varianza, S^2	189,096.7	154,437.5

$$s^2 = \frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n - 1}$$

Se aplicó el estimador de la varianza común, S_m^2

$$S_m^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

$$S_m^2 = \frac{(6 - 1)189,096.7 + (6 - 1)154,437.5}{6 + 6 - 2} = 1,022,702.1$$

Como Estadístico de Prueba, t_0 se utilizó como Método de Comparación de Medias Simples utilizando la Distribución de t-Student

$$t_0 = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{S_m \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{n}}}$$

$$t_0 = \frac{698.3 - 627.5}{1011.28 \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{1}{6}}} = 0.121$$

Se rechaza hipótesis nula si al comparar t_0 con la Distribución t-Student $n_1 + n_2 - 2$ con grados de libertad, si difieren en un valor mayor de

$$|t_0| > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1 + n_2} = |0.121| > t_{\frac{0.05}{2}, 6+6} = 2.228$$

El valor crítico obtenido de la Distribución t-Student con n=10 grados de libertad y 95% de confianza ($\alpha/2$) es de 2.228.

Por ser menor el estadístico de prueba de comparación de medias t_0 , 0.121 que el valor crítico de la Distribución t-Student, 2.228, **se acepta la Hipótesis Nula**, que considera que las medias de la producción de agua destilada de la caseta A y de la caseta B corresponden a la misma población y, por tanto, no hay diferencias significativas en el comportamiento de las dos casetas bajo las mismas condiciones meteorológicas durante el mismo ensayo y a pesar de las variaciones de días diferentes.

A.2 *Resultados del Experimento 2:*

Evaluación de la capacidad de producción de agua destilada al incrementar el área de evapotranspiración aplicando superficies porosas (tela de algodón)

Como se estableció en la Hipótesis del presente Trabajo Doctoral, se desea probar que habrá un incremento en la producción de agua destilada al aumentar el área de evaporación utilizando telas que incrementen el área por el proceso de evapotranspiración. Para ello, se aplicaron los niveles establecidos en la metodología en la caseta A, mientras que la caseta B sirvió de testigo.

A continuación, en la TABLA A.3 se presentan los resultados de agua destilada.

TABLA A.3 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO APLICANDO LOS NIVELES DE TRATAMIENTO EN LA CASETA A Y COMO TESTIGO LA CASETA B

	<i>k</i> : Área de evaporación + área de evapotranspiración, [m ²]					
	1.5	3.9	6.3	8.7	11.1	
Ensayo 1	150	340	2380	1880	600	Caseta A
		100	700	1720	80	Caseta B
		240	1680	160	520	Incremento
Ensayo 2	190	540	3420	2920	1020	Caseta A
		160	1220	1260	620	Caseta B
		380	2200	1660	400	Incremento
Ensayo 3	1080	840	1500	1000	1100	Caseta A
		140	700	260	620	Caseta B
		700	800	740	480	Incremento
Ensayo 4	1050	1500	1600	1000	890	Caseta A
		500	800	700	360	Caseta B
		1000	800	300	530	Incremento
Ensayo 5	680	700	1400	1000	840	Caseta A
		160	600	200	400	Caseta B
		540	800	800	440	Incremento
Ensayo 6	1040	1100	1200	700	880	Caseta A
		400	650	80	650	Caseta B
		700	550	620	230	Incremento
Ensayo 7	140	700	1500	1000	1240	Caseta A
		160	720	550	920	Caseta B
		540	780	450	320	Incremento
Ensayo 8	175	1100	3200	1100	1360	Caseta A
		400	800	950	960	Caseta B
		700	2400	150	400	Incremento

Para facilitar el análisis de resultados, se presenta, la producción bruta de agua destilada producto de los tratamientos, independientemente de las condiciones meteorológicas del día de cada ensayo.

TABLA A.4 PRODUCCIÓN BRUTA DE AGUA DESTILADA (mL d⁻¹) APLICANDO LOS NIVELES DE TRATAMIENTO

Ensayo	<i>k</i> : Área de evaporación + área de evapotranspiración, [m ²]				
	1.5	3.9	6.3	8.7	11.1
1	150	340	2380	1880	600
2	190	540	3420	2920	1020
3	1080	840	1500	1000	1100
4	1050	1500	1600	1000	890
5	680	700	1400	1000	840
6	1040	1100	1200	700	880
7	960	700	1500	1000	1240
8	175	1100	3200	1100	1360
promedio, \bar{y}_k	665.6	852.5	2,025.0	1,325.0	991.3
Promedio, \bar{Y}	1,171.9				

Se procedió a calcular la Suma de Cuadrados Total SS_T , aplicando la siguiente ecuación a los valores presentados en la Tabla A.5:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{Y})^2$$

TABLA A.5 SUMA DE CUADRADOS TOTAL SS_T

Ensayo	k : Área de evaporación + área de evapotranspiración, [m ²]				
	1.5	3.9	6.3	8.7	11.1
1	1,044,228.5	692,016.0	1,459,566.0	501,441.0	327,041.0
2	964,078.5	399,266.0	5,054,066.0	3,055,941.0	23,066.0
3	8,441.0	110,141.0	107,666.0	29,541.0	5,166.0
4	14,853.5	107,666.0	183,291.0	29,541.0	79,453.5
5	241,941.0	222,666.0	52,041.0	29,541.0	110,141.0
6	17,391.0	5,166.0	791.0	222,666.0	85,191.0
7	44,891.0	222,666.0	107,666.0	29,541.0	4,641.0
8	993,759.8	5,166.0	4,113,291.0	5,166.0	35,391.0
SS_T	20,746,184.4		20,746,184.4		

la suma de cuadrados de los tratamientos SS_A , aplicando la ecuación:

$$SS_A = r \sum_{i=1}^a (\bar{y}_k - \bar{Y})^2$$

TABLA A.6 SUMA DE CUADRADOS DE LOS NIVELES DE TRATAMIENTO SS_A

	k : Área de evaporación + área de evapotranspiración, [m ²]				
	1.5	3.9	6.3	8.7	11.1
promedio, \bar{y}_k	665.6	852.5	2,025.0	1,325.0	991.3
Promedio, \bar{Y}	1,171.9				
$(\bar{y}_k - \bar{Y})^2$	256,289.1	102,000.4	727,822.3	23,447.3	32,625.4
$SS_A =$	9,137,475.0				

y la suma de cuadrados del error experimental, SS_E , aplicando la ecuación:

$$SS_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_k)^2$$

TABLA 6.7 SUMA DE CUADRADOS DEL ERROR EXPERIMENTAL, SS_E

Ensayo	k : Área de evaporación + área de evapotranspiración, [m ²]				
	1.5	3.9	6.3	8.7	11.1
1	265,869.1	262,656.3	126,025.0	308,025.0	153,076.6
2	226,219.1	97,656.3	1,946,025.0	2,544,025.0	826.6
3	171,706.6	156.3	275,625.0	105,625.0	11,826.6
4	147,744.1	419,256.3	180,625.0	105,625.0	10,251.6
5	206.6	23,256.3	390,625.0	105,625.0	22,876.6
6	140,156.6	61,256.3	680,625.0	390,625.0	12,376.6
7	86,656.6	23,256.3	275,625.0	105,625.0	61,876.6
8	240,712.9	61,256.3	1,380,625.0	50,625.0	135,976.6
$(y_i - \bar{y}_k)^2$	182753.1	135535.7	750828.6	21355.2	58441.1
$SS_E =$	11,608,709.4				

Ahora es posible la aplicación de la siguiente Tabla de Análisis de Varianza:

Fuente de variación	G.L.	SS	MS	F
Entre tratamientos	$k-1$	SS_A^1	$SS_A / (k-1)$	MS_A / MS_E
Error	$(r-1)k$	SS_E	$SS_E / k(r-1)$	
Total	$kr-1$	SS_T		

con los valores obtenidos, se resuelve de la siguiente forma:

TABLA A.8. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) RESPECTO A PRODUCCIÓN BRUTA DE AGUA DESTILADA

Fuente de variación	G.L.	SS	MS	F
Entre tratamientos	4	9,137,475	2,284,369	3.94
Error	35	11,608,709	580,435	
Total	39	20,746,184.4		

Se rechaza hipótesis nula si al comparar t_0 con la Distribución de F Fischer, si el valor F obtenido experimentalmente es mayor que el límite de F de Fischer, con 95% de confianza

$$F > t_{\alpha, n_t y n_e} = > t_{0.05, 4, 35} = 2.65$$

El valor crítico obtenido de la Distribución de Fisher con $n=4$ grados de libertad en el numerador (entre tratamientos) y $n=35$ grados de libertad en el denominador (Error) y 95% de confianza ($\alpha/2$) es de 2.65.

Como $3.94 > 2.65$, se rechaza la Hipótesis Nula, lo que significa que existen diferencias significativas entre tratamientos, es decir, que el área de evapotranspiración agregada al área de evaporación tiene influencia en la producción de agua destilada.

y se acepta la:

Hipótesis Alternativa: La producción de agua destilada de la caseta A se incrementará con el aumento del área de evapotranspiración que se logra al incorporar superficies porosas verticales (telas) en contacto con las canaletas receptoras de agua salina (área de evaporación).

Sin embargo, se puede observar tanto en resultados numéricos como al graficar los resultados, que el incremento de producción de agua destilada con respecto al incremento de área de evapotranspiración no es una función lineal. Por ello se desarrollaron los análisis de varianza por parejas, a fin de encontrar las diferencias significativas. Así:

TABLA A.9 DIFERENCIAS ENTRE EL PRIMER Y SEGUNDO NIVEL DE TRATAMIENTO

Ensayo	3.9	6.3
1	340	2380
2	540	3420
3	840	1500
4	1500	1600
5	700	1400
6	1100	1200
7	700	1500
8	1100	3200
Promedio, Y		1438.75
promedio, k	852.5	2,025.0

La tabla de ANOVA del experimento para los niveles 1 y 2 es:

Fuente de variación	GL	SS	MS	F
Tratamiento	1	5,499,025.0	5499025	17.73
Error	14	6,204,550.0	310227.5	
Total	15	11,703,575.0		

La región crítica para $F > F_{\alpha(k-1, (n-1)k)}$, para un nivel de significancias α de 0.05 y grados de libertad (5-1), (8-1*5) es de $\alpha_{0.05, 4, 35}$ es de 4.6.

Como $17.73 > 4.6$, se rechaza la Hipótesis Nula, lo que significa que sí existen diferencias entre tratamientos, es decir, que el área de evapotranspiración agregada al área de evaporación en los valores de 6.3 y 3.9 m², si tiene influencia en la producción de agua destilada.

Entre el nivel 2 y el nivel 3, los resultados son:

Ensayo	6.3	8.7
1	2380	1880
2	3420	2920
3	1500	1000
4	1600	1000
5	1400	1000
6	1200	700
7	1500	1000
8	3200	1100
Promedio, Y	1675	
promedio, k	2,025.0	1,325.0

El análisis de varianza muestra que:

Fuente de variación	GL	SS	MS	F
Tratamiento	1	1,960,000	1,960,000	4.37
Error	14	8,971,600	448,580	
Total	15	10,931,600		

Como el valor de F obtenido experimentalmente es $4.3 < 4.6$ que es el valor de F crítico, se acepta la Hipótesis Nula, lo que significa que no existen diferencias entre tratamientos, es decir, que el área de evapotranspiración agregada al área de evaporación en los valores de 6.3 y 8.7 m², no tiene influencia en la producción de agua destilada.

La comparación de los niveles de tratamiento del máximo valor, obtenido en el segundo nivel y el de mayor área de evapotranspiración, cuarto nivel, se muestra a continuación.

Ensayo	6.3	11.1
1	2380	600
2	3420	1020
3	1500	1100
4	1600	890
5	1400	840
6	1200	880
7	1500	1240
8	3200	1360
Promedio, Y	1508.125	
promedio, k	2,025.0	991.3

En ellos se observa una considerable disminución del caudal de agua destilada producida. El análisis de varianza demuestra que:

Fuente de variación	GL	SS	MS	F
Tratamiento	1	4,274,556	4,274,556	15.09
Error	14	5,664,888	283,244	
Total	15	9,939,444		

Como $15.09 > 4.6$, se rechaza la Hipótesis Nula, lo que significa que existen diferencias entre tratamientos, es decir, que el área de evapotranspiración agregada al área de evaporación en los valores de 6.3 y 11.1 m², si tiene influencia en la producción de agua destilada, aunque en un sentido inverso al esperado, dado que la mayor área produce el menor caudal de agua destilada.