



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE
INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO
INTEGRAL REGIONAL, UNIDAD MICHOACÁN.**



**CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE DOS
DISPOSITIVOS QUE UTILIZAN ENERGÍA SOLAR
PARA DESALINIZAR AGUA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
SUSTENTABLE

PRESENTA:

JORGE LUIS GÓMEZ MAGALLÓN

DIRECTORES DE TESIS:

DRA. MARTHA ALICIA VELÁZQUEZ MACHUCA

DR. JOSÉ NÚÑEZ GONZÁLEZ

JIQUILPAN DE JUAREZ, MICHOACÁN, MÉXICO DICIEMBRE DE 2016

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO
INTEGRAL REGIONAL, UNIDAD MICHOACÁN**

**CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE DOS DISPOSITIVOS
QUE UTILIZAN ENERGÍA SOLAR PARA DESALINIZAR
AGUA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE

PRESENTA:

JORGE LUIS GÓMEZ MAGALLÓN

DIRECTORES DE TESIS:

DRA. MARTHA ALICIA VELÁZQUEZ MACHUCA

DR. JOSÉ NÚÑEZ GONZÁLEZ

JIQUILPAN, MICHOACÁN DICIEMBRE DE 2016



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Jiquilpan, Michoacán siendo las 12:00 horas del día 3 del mes de Noviembre del 2015 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIDIR Unidad Michoacán para examinar la tesis titulada:

Construcción y evaluación de dos dispositivos que utilizan energía solar para desalinar agua

Presentada por el alumno:

Gómez	Magalón	Jorge Luis
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre

Con registro:

B	1	4	0	9	1	0
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:


Maestría en Ciencias en Producción Agrícola Sustentable

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA
Directores de tesis


Dra. Martha Alicia Velázquez Machuca


Dr. José Núñez González


Dr. José Luis Montañez Soto


Dr. José Venegas González


Dr. José Luis Cimentel Equihua


Dra. Hortencia Gabriela Mena Violante,
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES.





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Jiquilpan de Juárez Michoacán el día 14 del mes de Noviembre del año 2016, el (la) que suscribe C. Jorge Luis Gómez Magallón alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Producción Agrícola Sustentable con número de registro B140910, adscrito a C.I.I.D.I.R. I.P.N. Unidad Michoacán, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la Dra. Martha Alicia Velázquez Machuca y del Dr. José Núñez González y cede los derechos del trabajo titulado CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE DOS DISPOSITIVOS QUE UTILIZAN ENERGÍA SOLAR PARA DESALINIZAR AGUA, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección (malivelazquez@hotmail.com; biacullax@gmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

C. Jorge Luis Gómez Magallón

Agradecimientos

A CONACYT por el apoyo económico que me brindo durante todo el período de la maestría.

Al CIIDIR-MICH, por facilitarme todo el equipo, laboratorios y de sus instalaciones que se requirieron para la realización de este proyecto.

Al programa de Becas de Estimulo Institucional de Formación de Investigadores, por el apoyo económico que recibí.

A mis padres Ricardo Gómez y Patricia Magallón por estar siempre cuando los necesito y motivarme cada día.

A mis directores de tesis Dra. Martha Alicia Velázquez Machuca y José Núñez González por su asesoramiento, disponibilidad y apoyo constante durante la realización de este trabajo.

A mi comité conformado por el Dr. José Luis Pimentel Equihua, Dr. José Luis Montañez Soto y al Dr. José Venegas González, por sus valiosas aportaciones en este trabajo.

A mis maestros y amigos M en C. Carlos Escalera Gallardo y Dr. Gustavo Cruz Cárdenas.

A los técnicos del laboratorio de aguas C. Jazmín Medellín y Lic. Héctor Andrade, por su asesoramiento y todas las enseñanzas que obtuve de ellos.

A mis amigos de la Universidad de la Ciénega, M en C. Lambertino Campos Amezcua, C. Jesús Moreno Méndez, C. Juan Carlos Suarez Rivera, a los técnicos del laboratorio de energía, Ing. Daniel Vega Munguía e Ing. Osbaldo Ordaz Murillo y C. Manuel Rodrigo Gálvez Godínez.

A mis compañeros del CIIDIR por los buenos momentos y enseñanzas compartidas.

A TODOS ELLOS GRACIAS.

Índice

Abstract	2
I. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Situación contextual del agua	3
1.1.1 Distribución hídrica	3
1.1.2 Problemática hídrica en Michoacán	6
1.1.3 Región Ciénega de Chapala, Michoacán.....	6
1.2 Tipos de tratamiento de agua.....	9
1.2.1 Tratamientos Primarios.....	9
1.2.2 Tratamientos secundarios.....	10
1.2.3 Tratamientos terciarios o avanzados	10
1.3 Ósmosis inversa.....	11
1.4 Destilación solar.....	15
1.5 Energías renovables y sustentabilidad.....	17
1.5.1 Energía solar térmica.....	17
1.5.2 Energía solar fotovoltaica	18
1.5.3 Energía solar fotovoltaica en México	18
1.6 Análisis de ciclo de vida	19
1.7 Planteamiento del problema.....	21
1.8 Objetivos	23
1.8.1 Objetivo General.....	23
1.8.2 Objetivos específicos	23
II. MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.1 Muestreo de agua	23
2.3.1 Sistema de Osmosis inversa.....	26
2.3.1.1 Principales componentes de la ósmosis inversa.....	28
Etapa 2 (E2).....	29
Etapa 3 (E3).....	29

Etapa 4 (E4).....	29
Etapa 5 (E5).....	30
2.3.1.1 Dimensionamiento	31
Dimensionamiento fotovoltaico	31
Comportamiento de permeado de la ósmosis inversa	39
2.3.1.2 Construcción general del sistema	40
2.3.2 Destilador solar	42
2.3.2.1 Partes destilador solar preliminar.....	44
2.3.2.2 Dimensionamiento	47
2.3.2.2.1 Dimensionamiento fotovoltaico	47
2.3.2.2.2 Comportamiento térmico.....	47
2.3.2.3 Construcción del destilador solar preliminar	50
2.3.2.4 Construcción del destilador solar final.....	52
2.3.2.4.1 Principales componentes del destilador solar	52
2.3.2.4.2 Construcción del destilador final	53
2.4 Análisis financiero de los dispositivos	54
2.5 Análisis estadístico.....	55
2.6 Análisis del ciclo de vida ACV	55
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
3.1 Requerimientos de la ósmosis inversa (OI).....	56
3.1.1 Necesidades energéticas.....	56
3.1.2 Comportamiento osmótico y de flujo	56
3.2 Requerimientos del destilador solar (DS).....	58
3.2.1 Necesidades energéticas.....	58
3.4 Parámetros de calidad del agua para uso y consumo humano.....	63
3.5 Análisis físico-químicos y químicos de las aguas tratadas.....	64
3.7 Análisis financiero	73
3.7.1 Análisis financiero del sistema de bombeo	73
3.7.2 Análisis financiero de ósmosis inversa	73
3.7.2 Análisis financiero del destilador solar	76

3.8 Análisis de ciclo de vida (ACV) de ambos dispositivos	77
IV. CONCLUSIONES	81
Referencias	84

Índice de figuras

Figura 1. Distribución mundial del agua.	4
Figura 2. Índice de peligrosidad del agua de pozos profundos en la Ciénega de Chapala, Michoacán.....	8
Figura 3. Clases de agua subterránea para uso agrícola en la Ciénega de Chapala, Michoacán.....	9
Figura 4. Diagrama del proceso de ósmosis inversa.....	13
Figura 5. Membrana semipermeable usada en ósmosis inversa.	14
Figura 6. Sistema integrado de ósmosis inversa (OI).....	15
Figura 7. Diagrama del funcionamiento de un destilador solar.....	17
Figura 8. Tabla de incidencia de radiación en México.....	19
Figura 9. Esquema del análisis de ciclo de vida (ACV) de un producto	20
Figura 10. Localización del Distrito de Riego 024.	24
Figura 11. Sitios de muestreo de agua subterránea en la Ciénega de Chapala, Michoacán.....	25
Figura 12. Diagrama de funcionamiento del dispositivo de ósmosis inversa.....	28
Figura 13. Membrana semipermeable espiral.	30
Figura 14. Proceso de ósmosis inversa.....	31
Figura 15. Configuración electrónica de los paneles fotovoltaicos.	32
Figura 16. Tempo control.	33
Figura 17. Batería de 19 celdas.	34
Figura 18. Inversor de corriente (12-110) v.	34
Figura 19. Diagrama del sistema fotovoltaico.....	35
Figura 20. Cables sin conexiones.	37
Figura 21. Mediciones en los paneles.	37

Figura 22. Construcción del sistema Fotovoltaico.	38
Figura 23. Paneles fijados.	38
Figura 24. Diagrama de funcionamiento del dispositivo de ósmosis inversa (OI).	40
Figura 25. Cubierta del dispositivo de ósmosis inversa.	41
Figura 26. Construcción de la cubierta del dispositivo de ósmosis inversa.	42
Figura 27. Diagrama de funcionamiento del destilador solar.	45
Figura 28. Partes del destilador preliminar.	45
Figura 29. Destilador preliminar.	46
Figura 30. Eficiencia térmica de un tubo al vacío.	49
Figura 31. Construcción del destilador solar preliminar.	51
Figura 32. Destilador solar final.	52
Figura 33. Proceso de construcción del destilador solar.	54
Figura 34. Comportamiento térmico.	59
Figura 35. Clases de agua obtenidas de acuerdo al Diagrama de Richards.	63
Figura 36. Clases de aguas resultantes con el tratamiento de ósmosis inversa (OI) y destilación solar (DS), de acuerdo al diagrama de Richards.	72
Figura 37. Huella de carbono de los dispositivos.	78
Figura 38. Energía total consumida de ambos dispositivos.	79
Figura 39. Acidificación atmosférica de ambos dispositivos.	79
Figura 40. Eutrofización del agua de ambos dispositivos.	80

Índice de Tablas

Tabla 1. Agua renovable per cápita en diferentes países.	5
Tabla 2. Principales procesos terciarios para el tratamiento de agua.	11
Tabla 3. Producción agrícola en Michoacán.	22
Tabla 4. Materiales que conforman la membrana semipermeable en el sistema de ósmosis inversa.	29
Tabla 5. Rangos de operación de la membrana semipermeable.	30
Tabla 6. Características de un panel fotovoltaico.	32
Tabla 7. Eficiencias y deficiencias del destilador preliminar.	51
Tabla 8. Especificaciones de los tubos al vacío.	53

Tabla 9. Ficha técnica de la membrana semipermeable.	57
Tabla 10. Flujo de la membrana y presión necesaria para el permeado de cada punto de muestreo.	57
Tabla 11. Eficiencia de la membrana semipermeable.	58
Tabla 12. Radiación solar en la Ciénega de Chapala, Michoacán.	60
Tabla 13. Límites permisibles del agua para uso agrícola.....	61
Tabla 14. Análisis físico-químicos y químicos iniciales de las aguas muestreadas...	62
Tabla 15. Límites permisibles del agua para uso y consumo humano.	64
Tabla 16. Fuentes de agua seleccionadas para someterlas a tratamientos de desalinización.....	64
Tabla 17. Resultado de las aguas tratadas mediante ósmosis inversa.....	67
Tabla 18. Porcentaje de reducción de los valores de los parámetros de calidad del agua con el tratamiento de ósmosis inversa.	68
Tabla 19. Resultado de las aguas tratadas mediante destilación solar (DS).....	71
Tabla 20. Porcentaje de reducción del DS.	72
Tabla 21. Comparación de medias del destilador solar y ósmosis inversa.	73
Tabla 22. Listado de materiales y costos del equipo de bombeo.	74
Tabla 23. Lista de materiales y costos de la ósmosis inversa.	75
Tabla 24. Costos de mantenimiento de la ósmosis inversa.....	76
Tabla 25. Lista de materiales y costos del DS.....	77
Tabla 26. Costos de mantenimiento del destilador solar.	77

Resumen

En el presente trabajo se construyeron y evaluaron dos dispositivos que utilizan energía solar para desalinizar agua. Ambos dispositivos se pusieron a prueba con 14 muestras de aguas subterráneas y una del Lago de los Negritos, con la finalidad de determinar la calidad química del agua subterránea en la zona Ciénega de Chapala, Michoacán y la eficiencia de los procesos de tratamiento de agua de ósmosis inversa y destilación solar. Se realizaron análisis físico-químicos y químicos de las aguas seleccionadas antes y después del tratamiento utilizando los dos dispositivos: Los parámetros evaluados fueron: pH, C.E., SDT, Dureza, cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), aniones (CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}), metales pesados, P, B y N-NH_4 . Se realizaron los cálculos para el dimensionamiento del equipo de bombeo utilizando dos paneles fotovoltaicos de 36 v cada uno. Se caracterizaron ambos dispositivos mediante su comportamiento, térmico en el destilador solar y osmótico en el de ósmosis inversa con su respectivo dimensionamiento. Para observar la factibilidad de la futura utilización de estos dispositivos, se realizó un análisis financiero analizando los costos finales de construcción, mantenimiento y el costo que se tiene por litro de agua tratada. Por último se llevó a cabo un análisis de ciclo de vida para observar el impacto ambiental que presentaron dichos dispositivos en su construcción. Los resultados que se obtuvieron muestran que el destilador solar es más eficiente para desalinizar agua, aunque la ósmosis inversa presenta mayor producción por día.

Abstract

In the present work two devices that use solar energy to desalinate water were designed, built and evaluated. Both devices were put under 14 tests with groundwater and one from Lake of the Negritos, with the purpose of determining the chemical quality of groundwater in the area The Ciénega, Chapala, Michoacán and to determine the efficiency of water treatment processes of reverse osmosis and solar distillation. Using the two devices physico-chemical and chemical analysis of the selected waters were performed before and after the treatment, the parameters evaluated were: pH, E.C, TDS, Hardness, cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), anions (CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}), heavy metals (Fe, Mn, Cu, Zn), P, B and N-NH₄. The calculations were made for the sizing of the pumping equipment by using two photovoltaic panels 36v each. Both devices are characterized by their behavior, in the solar distiller and in reverse osmosis and their respective dimensioning. To observe the feasibility of future use of these devices, a financial analysis was performed by analyzing the final construction costs, maintenance and the cost for each liter of the treated water. Finally a life-cycle analysis was conducted to the environmental impact these devices presented in their construction. The results obtained show that the solar distiller is more efficient in terms of desalination but the reverse osmosis presents a greater production per day.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Situación contextual del agua

Cuando se habla acerca de la situación ambiental y ecológica del mundo, sin duda uno de los parámetros de mayor importancia son aquellos referentes al agua. En la actualidad su calidad y disponibilidad ha sido afectada por fuentes antropogénicas y naturales alertando a gran parte de la población mundial. Por otra parte, su desigual distribución geográfica ha llegado a generar problemas políticos y económicos, es por ello que este líquido vital no solo está implicado en las relaciones sociales, sino también en las naturales (García, 2007).

Según SEMARNAT(2012), existen aproximadamente 1,400 millones de kilómetros cúbicos de agua en el planeta, de los cuales solamente el 2.5% es agua dulce. Ese porcentaje se puede encontrar distribuido en ríos, lagos, glaciares, mantos de hielo y acuíferos alrededor del mundo. Sin embargo gran parte de esa agua se encuentra congelada en los polos siendo inaccesible para su uso.

Considerando el agua dulce no congelada, el agua subterránea representa el 96%, siendo de las fuentes hídricas de mayor importancia. Además el agua subterránea es de las más utilizadas como abastecedora de arroyos, manantiales y humedales así como fuente principal para proveer las necesidades sociales en el mundo. Por otro lado, las aguas superficiales como lagos, embalses, ríos, arroyos y humedales solo retienen aproximadamente el 1% de agua dulce no congelada. El agua atmosférica aunque es de volumen menor al que se encuentra en los lagos, resulta de suma importancia para la regulación del clima (SEMARNAT, 2012).

1.1.1 Distribución hídrica

El planeta tierra está cubierto en un 70% de su superficie por agua de lo cual, la mayor parte se encuentra en los océanos. Del total del agua, solo el 2.5% es agua dulce de la cual el 80% se encuentra congelado en los polos y glaciares, otra parte se encuentra bajo el suelo y en rocas. Apenas el 1% de toda el agua que hay en la tierra se encuentra disponible para uso y consumo humano y demás seres vivientes (Geoffrey, 2011). La distribución del agua dulce y salada se muestra en Figura 1.

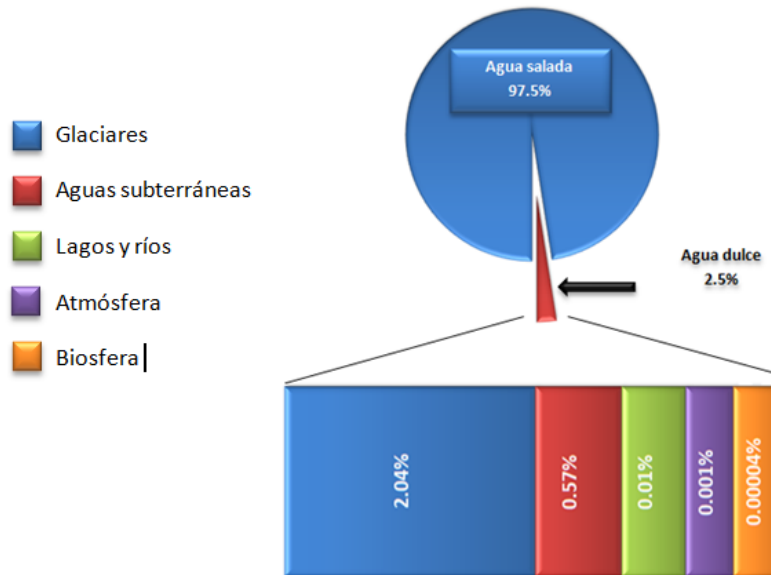


Figura 1. Distribución mundial del agua. Fuente: elaboración propia con datos de SEMARNAT (2012).

Alrededor de 113,000 km³ de agua se precipitan en la tierra cada año dentro del ciclo hidrológico, de ellos casi 71,000 km³ se evapora y regresa a la atmósfera, el resto recarga los acuíferos o retornan a los océanos a través de los ríos. No obstante a ello, el volumen realmente disponible es de aproximadamente de 9,000 y 14,000 km³. De acuerdo a estudios realizados casi 70% del agua disponible tiene la función de mantener la vida acuática y el otro 30% restante es directamente para los humanos, dejando un aproximado de 700 m³ al año para cada persona (Toledo, 1999).

El promedio de agua que se distribuye a cada persona resulta variable al paso del tiempo y depende directamente del lugar. El agua disponible para cada persona de un país es la resultante de dividir los recursos renovables entre el número de habitantes. En la Tabla 1, se observa la cantidad de agua disponible per cápita en diferentes países.

Tabla 1. Agua renovable per cápita en diferentes países. Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA (2011).

No.	País	Población (miles de habitantes)	Agua renovable (miles de millones de m³)	Agua renovable per cápita (m³/hab/año)
1	Guayana Francesa	220	134	609091
2	Islandia	315	170	539683
3	Guyana	763	241	315858
4	Surinam	515	122	236893
5	Congo	3615	832	230152
23	Brasil	191972	8233	42886
60	EUA	311666	3069	9847
86	México	108555	460	4263
104	Turquía	73914	232	2890
145	Sudáfrica	49668	50	1007

México se encuentra en el lugar 86 de cantidad de agua renovable en el mundo (CONAGUA, 2011), con agua *per cápita* por año de 4,263 m³, dividiendo ese dato por los 365 días que tiene el año tenemos un total de 11.67 litros por día por persona. Según SEMARNAT-CONAGUA (2015), la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que la cantidad aproximada para cubrir las necesidades básicas de higiene y alimentos es de 20 litros al día por habitante. Claramente se observa como solamente se llega a cubrir un poco más de la mitad *per cápita* según este estudio realizado en 2011.

Además de la escasez que presenta este recurso hídrico, hoy en día se tienen graves problemas de contaminación como lo es la salinidad de agua. La salinidad es una de las graves problemáticas, ya que la utilización de agua salina puede conducir a la desertificación; este es un fenómeno que va en aumento y la agricultura es una

de las principales actividades antrópicas responsables debido a la inadecuada utilización de agroquímicos, aunque otros factores también influyen como las características del suelo y las aguas subterráneas (Iannetta y Colonna, 2016)

La Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996), establece los límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, donde las aguas que son vertidas a los cuerpos de agua tienen que cumplir con ciertos parámetros. En México pocas veces se cumple con dichos requisitos, ya sea por cuestiones políticas o de infraestructura provocando que las personas e industrias no efectúen las labores de saneamiento requeridas (CONAGUA, 2011).

1.1.2 Problemática hídrica en Michoacán

Según SEMARNAT (2009), en Michoacán se producen 376 hm³ de aguas residuales por año, de las cuales se colecta 267.7 hm³ para la red de alcantarillado y solo el 85.3 hm³ de toda el agua residual es colectada al año, es decir solo el 31.9%. En Michoacán, se tiene en operación alrededor de 45 plantas de tratamiento de agua, con una capacidad instalada de 3.55 m³/s y un caudal de tratamiento de 2.47 m³/s (CONAGUA, 2011).

Una de las principales actividades económicas en Michoacán es la agricultura. La práctica de la agricultura intensiva ha ido en aumento provocando graves problemas de contaminación como lo es la salinidad en suelos y en aguas.

1.1.3 Región Ciénega de Chapala, Michoacán

La Región Ciénega de Chapala, Michoacán está ubicada dentro del Distrito de Riego 024, con un total de 46,171 hectáreas de las cuales la mayoría son ejidales. En esta zona existe una gran cantidad de canales, arroyos, presas y ríos que desembocan en el lago de Chapala, la mayoría utilizados para riego agrícola (Silva *et al.*, 2006).

Cada día, las fuentes de agua disponibles en la Ciénega de Chapala, Michoacán para uso humano y agrícola van disminuyendo. Chávez *et al.* (2010) indican que un factor importante sobre esta problemática se debe al gran deterioro del agua causada por la contaminación. Además de la notoria disminución del nivel del lago, ríos y presas.

Se han tomado medidas para abastecer de agua a las personas que lo requieren, como la perforación de pozos profundos. Sin embargo, la perforación de pozos de manera clandestina, así como el uso inadecuado y desmedido de ellos han ido provocando problemas de sobreexplotación, disminución de caudales y problemas de salinidad en las aguas subterráneas; actualmente se tiene un aproximado de 425 perforaciones registradas (Silva *et al.*, 2002). Pocos trabajos de investigación se han realizado para atender esta problemática en esta zona.

Estrada (2008) realizó estudios sobre el nivel de salinidad en que se encontraban las aguas subterráneas utilizadas para riego. Los muestreos que hizo los clasificó de acuerdo a su nivel de peligrosidad en bajo, medio, alto y muy alto, basándose en el diagrama de Richards propuesto por Ayers y Westcot (1989), en donde se considera el nivel de conductividad eléctrica (CE) respecto a la relación de adsorción de sodio (RAS).

En la Figura 2, se puede observar como gran parte de Villamar y la zona que se ubica entre la Magdalena y Venustiano Carranza, en La Ciénega de Chapala, presenta niveles de peligrosidad de agua clasificada como muy alta, además de tener muchas zonas como San Gregorio, La Magdalena y parte de Venustiano Carranza a Los Negritos de alta peligrosidad. Pocos lugares fueron clasificados como de bajo nivel de peligrosidad y casi la mitad de nivel medio de peligrosidad.

Los datos anteriores muestran la situación por la que pasa la Ciénega de Chapala, Michoacán, y de los diversos problemas de contaminación en suelo y aguas en pozos profundos utilizados para riego y en ocasiones para consumo humano. Otra de las problemáticas es que la Ciénega de Chapala, Michoacán es una cuenca cerrada, motivo por el cual las sales se depositan en las partes bajas y no es posible eliminarlas, aunado a esto se encuentran las otras fuentes de contaminación denominadas puntuales y difusas. Por tal motivo una de las posibles soluciones se encuentra en el tratamiento de aguas.

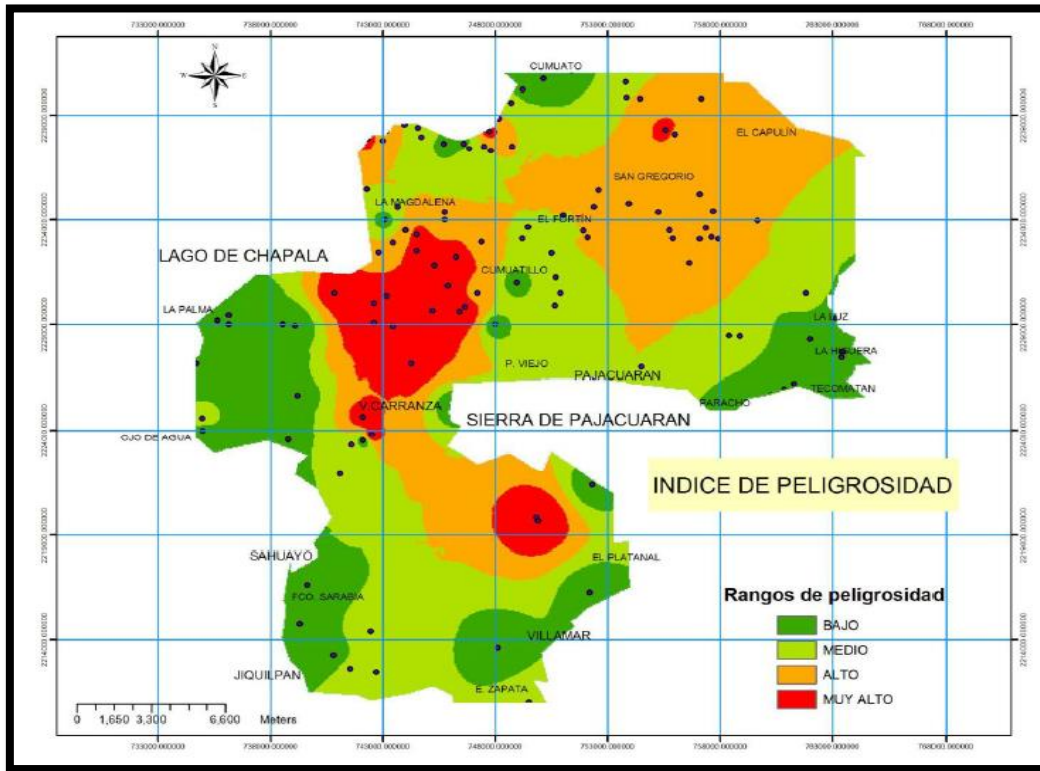


Figura 2. Índice de peligrosidad del agua de pozos profundos en la Ciénega de Chapala, Michoacán. Fuente: Estrada (2008).

En la Figura 3 se observa como la mayor parte de las muestras obtenidas se encuentran en un rango de CE medio y alto y con un RAS medio, no obstante a eso también hay muestras con un CE y RAS elevado. A partir de aquí se consideró que actualmente la Ciénega de Chapala, Michoacán cuenta con aguas de buena, media y baja calidad; sirviendo esto de referencia para la toma de muestras de esta investigación.

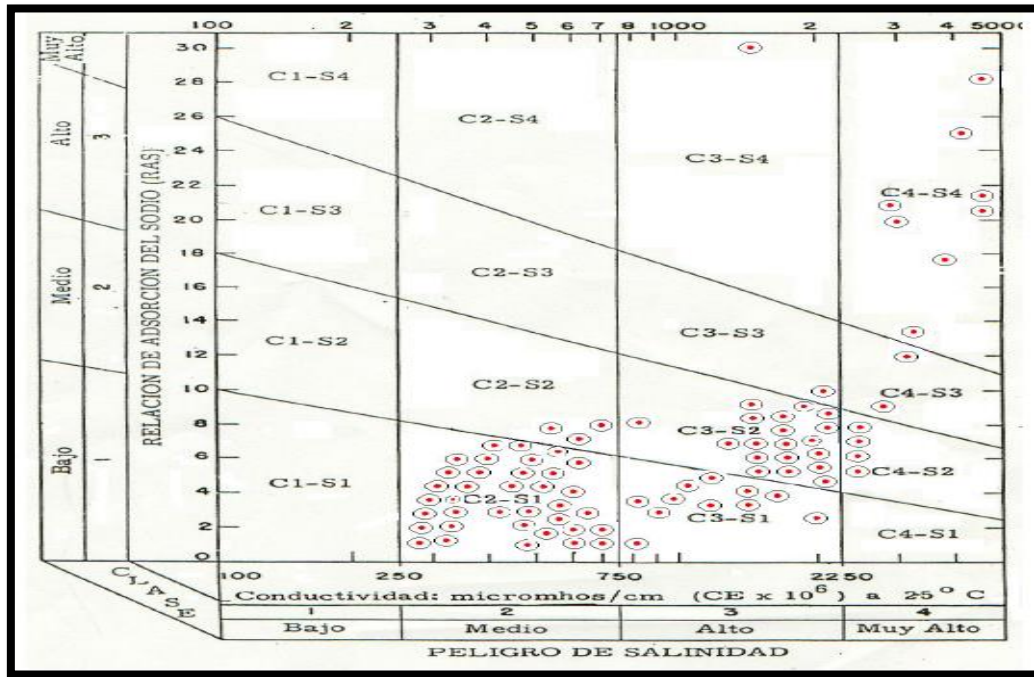


Figura 3. Clases de agua subterránea para uso agrícola en la Ciénega de Chapala, Michoacán. Fuente: Estrada (2008).

1.2 Tipos de tratamiento de agua

La contaminación del agua se puede dar por diversas maneras, algunas de ellas son: la industria, zonas habitacionales y la agricultura. Por tal motivo el agua trae consigo partículas muy variadas de contaminación (productos químicos y materia orgánica e inorgánica), debido a lo cual se requiere un sistema de tratamiento diferente de acuerdo a las características físico-químicas y químicas que presente el cuerpo de agua (Rodie y Hardenberg, 2001).

Los tratamientos se dividen en primarios, secundarios y terciarios, esto en base a su nivel de complejidad y a su ubicación en el proceso de limpieza del agua.

1.2.1 Tratamientos Primarios

“Tiene como objetivo la remoción por medios físicos o mecánicos de una parte sustancial del material sedimentable o flotante” (Rojas, 2002). En otras palabras, puede remover gran cantidad de materia orgánica que puede representar entre el 25% y el 40% de la demanda biológica de oxígeno y entre el 50% y el 65% de los sólidos suspendidos.

Algunos de ellos son: Mallas o barreras, remoción de aceites y sólidos, maceración y sedimentación.

1.2.2 Tratamientos secundarios

Este proceso tiene como objetivo la eliminación de la materia disuelta como: sales disueltas, materia orgánica biodegradable y sustancias extremadamente pequeñas como metales pesados y pesticidas (Rodríguez *et al.*, 2006).

Algunos de ellos son: Lodos activados, camas filtrantes, placas rotativas, filtros airados biológicos, sedimentación secundaria, entre otros.

1.2.3 Tratamientos terciarios o avanzados

“Estos tratamientos proporcionan una etapa final para aumentar la calidad del agua al estándar requerido antes de que sea descargada al ambiente.” (Sánchez, 2014). Entre los más importantes se tienen: Filtración, desinfección de aguas, cloro, luz ultravioleta, ozono, ósmosis inversa destilación solar, entre otras. También a su vez este tipo de proceso es el más efectivo para remover sales de las aguas.

CONAGUA (2011) muestra datos (Tabla 2) de los diferentes procesos y su eficiencia en remover los contaminantes del agua. Del mismo modo se observa como los métodos de ósmosis inversa y destilación solar son los más eficientes, pues actúan ante más contaminantes, razón por la cual se optó por analizar estos métodos para poder diagnosticar su viabilidad en la desalinización de agua para uso agrícola en la Ciénega de Chapala, Michoacán.

La tecnología de ósmosis inversa ha ido creciendo rápidamente con el paso del tiempo. Toma su nombre por ser el proceso contrario al de la ósmosis y ha sido considerada como una solución para los problemas de salinización; comparándola ante los demás procesos, la han nombrado tecnología verde, ya que resulta un proceso económico y amigable ambientalmente (Herold y Neskakis, 2001)

Tabla 2. Principales procesos terciarios para el tratamiento de agua.Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA (2011).

CONTAMINANTES	PROCESOS												
	FMP	FS	MF	UF	OI	ED	AD	AA	II	PAOs	DE	PQ	OQ
MATERIA SUSPENDIDA Y COLOIDAL													
SST	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X	
SÓLIDOS COLOIDALES	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X	
MATERIA ORGANICA PARTICULADA					X	X					X		X
MATERIA ORGANICA DISUELTA													
CARBONO ORGANICO TOTAL					X	X	X		X	X	X	X	X
COMPUESTOS ORGANICOS REFRACTARIOS					X	X	X			X	X		
COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES					X	X	X			X	X		
MATERIA INORGÁNICA DISUELTA													
AMONIACO					X	X		X	X		X		
NITRATO					X	X			X		X		
FÓSFATO					X	X					X	X	
SDT					X	X			X		X		
AGENTES BIOLÓGICOS													
BACTERIAS			X	X	X	X					X		
PROTOZOARIOS			X	X	X	X	X		X		X	X	
VIRUS					X	X					X		

FMP	filtración de medio poroso	AD	Adsorción
FS	Filtración de superficie (microcribias)	AA	Arrastre con aire
MF	Microfiltración	II	Intercambio iónico
PAO´s	Proceso de oxidación avanzada	DE	Destilación
OI	Ósmosis inversa	PQ	Precipitación química
ED	Electrodialisis	OQ	Oxidación química

1.3 Ósmosis inversa

La historia de la ósmosis data desde 1748 cuando el profesor de la Universidad de Navarra llamado Abbe Noliet (1700-1770) desarrolló una membrana a partir de la vejiga de un animal, colocó agua de un lado y alcohol del otro y observó que el fluido con menor densidad se desplazaba hacia el de mayor densidad hasta alcanzar un equilibrio. Así, Noliet con la creación de la membrana pudo definir el concepto de proceso osmótico, nombrando solvente al fluido capaz de atravesar la

membrana y soluto al que no era capaz de atravesarla, sin embargo no pudo explicar cómo ocurre este fenómeno (Kołtuniewicz, 2006),

Henri Dutrochet (1776-1847) en el año de 1828, descubrió que el paso de un solvente a través de una membrana semipermeable ocurría siempre de la solución con menor cantidad de sales, que no puede pasar, hacia la de mayor cantidad de sales. Además observó que el solvente que fluía era capaz de generar una presión a la membrana a la cual llamó presión osmótica. Sin embargo no fue hasta que el botánico Pfeffer (1845-1820) en el año 1877 que realizó la medida cuantitativa de este fenómeno.

A finales de los 60's y 70's, se presentó un importante avance en las tecnologías usadas para la desalinización de agua. Hoy en día cerca de 15,000 plantas de desalinización están en operación en todo el mundo y aproximadamente el 50% son de ósmosis inversa (OI) o por sus siglas en inglés, RO (Reverse osmosis); Los países del Este Medio mantiene aproximadamente el 50% de la capacidad de producción manteniéndose como los líderes mundiales en desalinización (Greenlee *et al.*, 2009).

El sistema toma su nombre por realizarse el paso de las soluciones en forma contraria a los procesos osmóticos normales. Es decir, las soluciones menos concentradas se desplazan, por diferencia de energía potencial, hacia las más concentradas a través de una membrana semipermeable sin necesidad de aplicar ninguna fuerza externa.

La ósmosis se define como el flujo espontáneo de agua de una solución diluida a otra más concentrada pasando a través de una membrana semipermeable. En la ósmosis inversa este fenómeno ocurre de manera contraria: la solución con mayor concentración pasa a la más diluida mediante la aplicación de una fuerza de compresión (Figura 4). La membrana es la pieza clave de la ósmosis inversa, Hernández *et al.* (1990) mencionan que cualquier barrera física entre dos fluidos permitiendo el paso controlado de ellos es considerado una membrana.

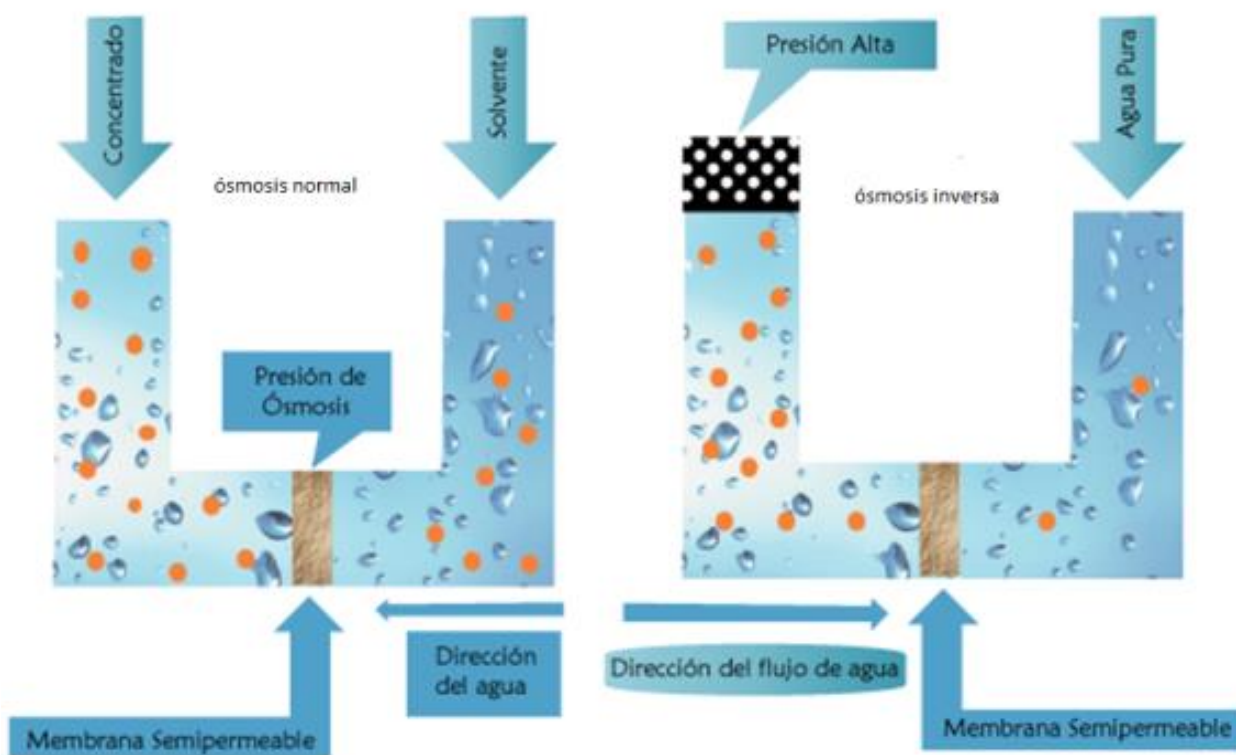


Figura 4. Diagrama del proceso de ósmosis inversa.

La parte fundamental para que ocurra el proceso de la osmosis es la membrana (Figura 5); ésta cuenta con una densa barrera en la matriz polimérica donde ocurre la separación. En muchos de los casos la membrana está diseñada para permitir el paso de agua a través de su densa capa y prevenir el paso de solutos tales como iones de sales. Este proceso requiere de la aplicación de grandes presiones en la parte donde están las altas concentraciones de soluto, usualmente de 2 a 7 bares para agua potable y salobre y 40 a 70 bares para agua de mar, la cual tiene alrededor de 30 bares de presión osmótica natural que se debe de superar; esto también depende del modelo de membrana. La velocidad de flujo dependerá de la presión osmótica así como la concentración, el gradiente electroquímico y la temperatura de las moléculas o de los solutos en cualquiera de los lados, así como la permeabilidad de la membrana para cada soluto (Rao, 1970).



Figura 5. Membrana semipermeable usada en ósmosis inversa.

Una gran cantidad de personas en el mundo actualmente están sufriendo por la escasez de agua potable. Se estima, según estudios realizados en el 2000 por la OMS y UNICEF, que alrededor de dos mil millones de personas están siendo afectadas en más de 40 países; de ellos aproximadamente 1,100 millones no cuenta con suficiente agua potable y 2,400 millones no cuentan con algún sistema de potabilización, causando un grave problema sanitario (UNESCO, 2016). Por lo cual es necesario encontrar algunas alternativas para aminorar esta problemática.

La desalinización de agua mediante la OI utilizando energía fotovoltaica (EF) (Figura 6) ha llegado a ser una técnica viable debido a que los generadores fotovoltaicos son silenciosos no contaminan y no necesitan de un mantenimiento sofisticado, pero lo más importante es que el combustible sol es abundante, libre, renovable lo que lo hace una fuente de poder muy económica. Por otra parte el proceso de OI es un método muy eficaz que elimina no sólo los iones inorgánicos, sino también los iones provenientes de la materia orgánica (Hrayshat, 2008).

Un dispositivo de OI alimentado por EF tiene un sistema muy básico como se muestra en la Figura 6, haciendo que sea simple su implementación. En otros

lugares se ha optado por métodos similares; en algunos lugares donde la incidencia de radiación es baja, se han colocado espejos para poder tener una mejor concentración de sol en el panel y un intercambiador de calor, como es el caso de Kelley y Dubowsky (2013), quienes mencionan que en su diseño se descuidan los gradientes de temperatura a lo largo de la superficie de los paneles, lo que supone que haya una mezcla de agua dentro del intercambiador de calor.

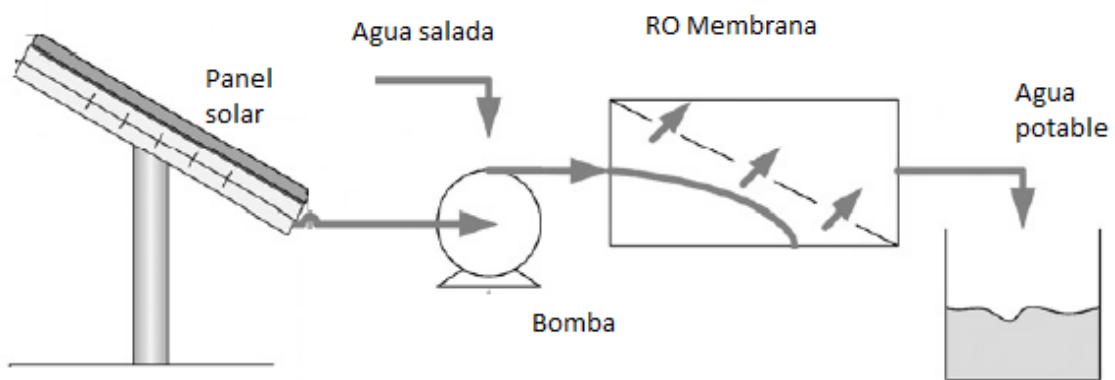


Figura 6. Sistema integrado de ósmosis inversa (OI).

Por otra parte, otra técnica muy utilizada en la desalinización de agua es la destilación solar (DS). Este proceso aunque en ocasiones lento presenta características sustentables debido a su bajo consumo energético presenta.

1.4 Destilación solar

En el año de 1952 en la Universidad de California se elaboró el primer destilador solar, pero no fue sino hasta en 1956 que fueron puestos en operación. La elaboración de estos fue con materiales como vidrio y madera, llegando a obtener eficiencias de 8.14 L/m²d. Con el paso de los años, una gran variedad de diseños surgieron volviéndose cada vez más eficientes (Fuentes, 2005).

Yabroudi *et al.* (2011) realizaron una investigación acerca del desarrollo de la tecnología de DS, observando que muchos de los proyectos relacionados con esta

tecnología tienen producción de 0.2 hasta 15 L/m²d. Los autores mencionan que para tener una mayor producción es necesario incluir piezas de mayor costo y difícil manejo y por consiguiente se presenta un aumento en su costo.

Un destilador solar (Figura 7) es un sistema relativamente sencillo y a su vez eficiente que permite reproducir de manera acelerada los ciclos naturales de evaporación y condensación del agua, que al utilizarlos de manera controlada se puede obtener agua pura. Este proceso quita las sales, elimina residuos de hongos, bacterias, virus y demás contaminantes, obteniendo agua apta para consumo humano. Dentro de este proceso los más utilizados son: destilación súbita multietapa, destilación multiefecto, compresión de vapor y ósmosis inversa. Existen otros procesos, pero estos son los más utilizados debido a que se pueden llegar a aplicar a agua de mar también y a su vez son los que más desarrollo científico tienen en la actualidad (De la Cruz, 2006).

El método de desinfección del agua implementando energía solar, es un método popular a nivel mundial por sus abreviaturas en inglés SODIS (Solar Water Desinfection). Su investigación fue iniciada por el profesor Aftim Acra en 1979, quien fue investigador y profesor de la universidad americana de Beirut. El método fue desarrollado para la UNICEF en 1984, donde se descubrió que al exponer agua a la radiación solar durante un periodo de tiempo, el número de microorganismos presente disminuye notablemente (Wegelin y Sommer, 1998).

La importancia de la desalinización del agua reside no solamente en la obtención de agua apta para consumo humano, sino que puede ayudar a reducir el problema de la salinidad en suelos cuando se usa para el riego agrícola. En la Ciénega de Chapala, Michoacán, el fenómeno de la salinización de los suelos ha crecido fuertemente, especialmente a partir del uso de aguas subterráneas de mediana a alta salinidad en el riego de cultivos, al punto de disminuir la superficie para uso agrícola; la zona cuenta, además, con una buena incidencia de energía solar que la hace adecuada para su utilización como fuente de energía renovable en los procesos de desalinización y debe de ser estudiada.

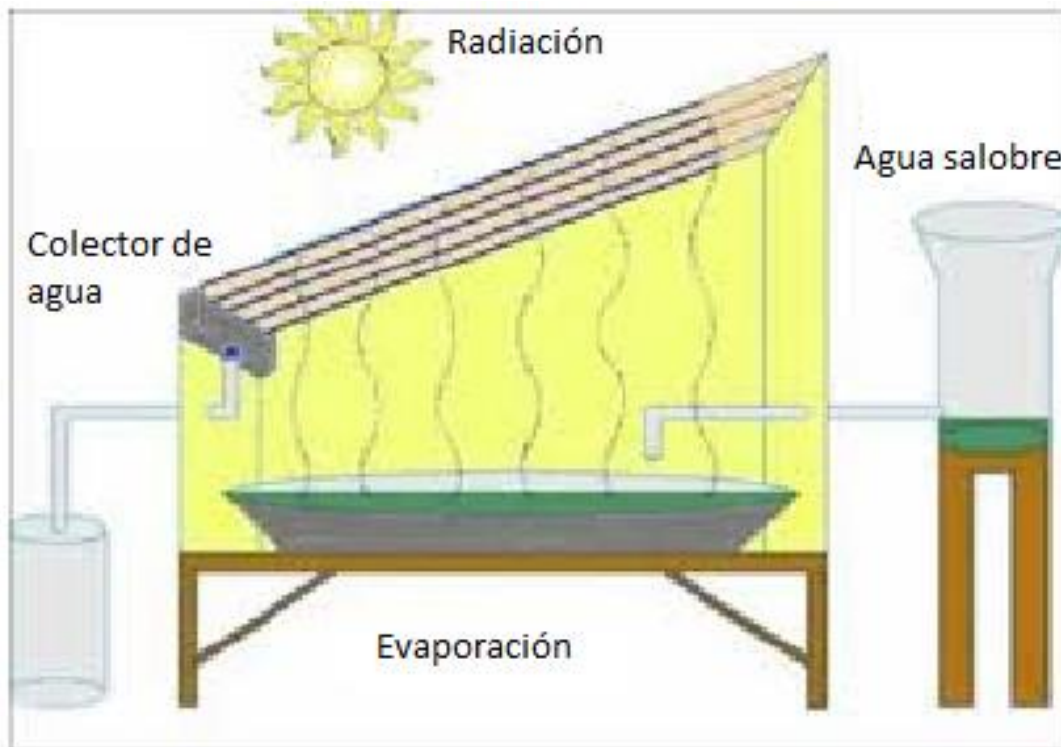


Figura 7. Diagrama del funcionamiento de un destilador solar.

1.5 Energías renovables y sustentabilidad

La utilización de combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica, ha provocado en décadas recientes el aumento considerable en las concentraciones de gases de efecto invernadero. Debido a esto, muchos países se encuentran en el dilema de cambiar este tipo de producción de energías convencionales a la renovable, como lo son: agua, viento, residuos, sol, etc. Estas últimas tienen la ventaja de que son amigables con el ambiente, ya que no contaminan siendo la energía solar la más utilizada en México (Edenhofer *et al.*, 2011). Existen diferentes formas de aprovechar la energía solar, dos de ellas son: solar térmica y solar fotovoltaica.

1.5.1 Energía solar térmica

Este tipo de energía consiste en aprovechar el calor que produce la radiación solar; comúnmente se utiliza para servicios domésticos como en calentadores

solares, agua caliente en tuberías, etc. También con el calor es posible producir energía mecánica y con esta mover un alternador y así obtener energía eléctrica. (Rufes, 2010).

1.5.2 Energía solar fotovoltaica

Se le denomina energía solar fotovoltaica a la conversión que realizan las celdas solares de energía solar a energía eléctrica. Este tipo de energía puede ser aprovechada de manera directa de los paneles o enviándola directamente a la red eléctrica de manera interconectada (Rufes, 2010).

1.5.3 Energía solar fotovoltaica en México

Según la Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica (EPAI), México se encuentra en el tercer lugar entre los países más atractivos de inversión de energía solar en el mundo después de China y Singapur. No solo por su situación geográfica con gran recurso solar, sino porque además cuenta con infraestructura y programas de apoyo para explotar el recurso solar (Leal, 2011).

Las fuentes de energía renovable son muy abundantes en el planeta. Se dice que solamente la incidencia de radiación solar sobre la tierra cada diez días equivale a todas las reservas conocidas de carbón y gas. México se encuentra dentro de la llamada “Franja solar” o “cinturón de fuego”, teniendo con esto un importante potencial de energía solar en el mundo (Estrada y Arancibia, 2010).

En la Figura 8 se observa los índices de incidencia de radiación en México, los cuales tienen valores mayores a 5.6 kWh/m^2 en la mayor parte del territorio y solo en tres estados los valores son de 4.8 kWh/m^2 . Del mismo modo, se puede ver que Michoacán se encuentra en la zona con una potencia de entre 5 a 5.1 kWh/m^2 , por lo cual se puede concluir que en general en todo el estado es viable el aprovechamiento de Energía fotovoltaica.

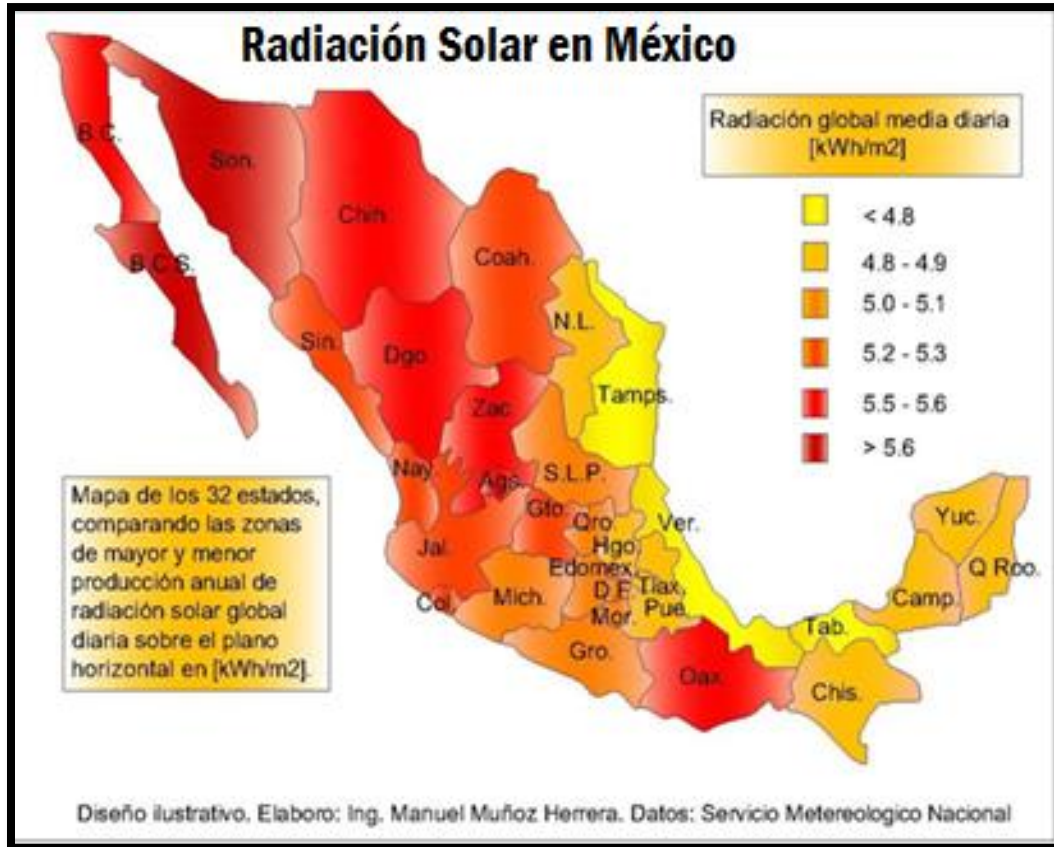


Figura 8. Tabla de incidencia de radiación en México.

Por tal motivo La Ciénega de Chapala, Michoacán, es una zona donde se puede desarrollar una gran variedad de estudios, en este caso de estudios de los procesos de tratamiento de aguas utilizando la energía solar. Un factor que actualmente es considerado en la construcción de cualquier dispositivo, es su ciclo de vida con la finalidad de observar el impacto ambiental que presentará.

1.6 Análisis de ciclo de vida

Actualmente, la preocupación que tiene la sociedad con el ambiente ha provocado poco a poco que las industrias brinden productos y servicios de calidad, que cumplan con las expectativas de las personas y a la vez pensando en cuidar el ambiente para las futuras generaciones. La Organización Internacional para la Estandarización (ISO), se ha encargado de generar una serie de estándares enfocados a la gestión ambiental, tales estándares son las NOM ISO-14040 hasta

la ISO-14044 sobre el análisis de ciclo de vida (ACV), que son de carácter voluntario (Romero, 2003).

La NOM ISO-14040 (1997) aborda todos los parámetros implicados en un impacto ambiental, a lo largo del ciclo de vida de un producto, comprendiendo las actividades dadas desde la extracción de la materia prima, los contaminantes resultantes durante su fabricación, ensamblaje de componentes, el uso del producto, hasta el final de la vida útil del producto. Siguiendo el ciclo que se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Esquema del análisis de ciclo de vida (ACV) de un producto.

Fuente: (Agrelo, 2016).

La NOM ISO-14041(1998), se encarga de estudiar a fondo el propósito, alcance y calidad de los datos que se den en el estudio de impacto ambiental considerando también datos como el aspecto geográfico; es esencialmente un inventario de

entrada y salida del sistema que se esté analizando. Una vez contando con los datos precisos de inventario, la NOM ISO-14042 (2000), es la encargada de mostrarnos una guía sobre la fase de impactos ambientales, dividiéndola en tres categorías; salud humana, entorno natural y recursos naturales. La NOM ISO-14043 (2000), es la encargada de interpretar los datos con los parámetros que se le hayan puesto dependiendo del objetivo del estudio, a la vez incluye el tema de estudio y el motivo que se tuvo para realizarlo.

En la actualidad, se han desarrollado numerosos software's para el análisis de resultados los cuales utilizan distintas metodologías, ellos introducen los datos que configuran el inventario, para posteriormente realizar los cálculos requeridos (No conocido, 2016.). Algunos ejemplos de estos tipos de programas son: GaBi, Simapro, Umberto, SolidWorks entre otros. En esta investigación se utilizó para el ACV el software SolidWorks, ya que utiliza la metodología CML, elaborada por el Instituto de Ciencias Medioambientales de la Universidad de Leiden en los Países Bajos. De acuerdo con Solidworks (2016), esta metodología es la más utilizada y es considerada de las más completas, usa datos europeos para los análisis y agrupa temáticas como el cambio climático o grupos como la toxicidad ecológica.

1.7 Planteamiento del problema

En Michoacán, una de las principales actividades económicas es la agricultura, encontrándose en el segundo lugar a nivel nacional en producción agrícola según Flores (2013) y situándose como líderes en producción de una gran variedad de cultivos (Tabla 3) (INEGI, 2014). Sin embargo en la actualidad este sector ha comenzado a presentar problemas de contaminación como lo es la salinidad en suelos y aguas (superficiales y subterráneas). La creciente salinización de las fuentes de agua subterránea afecta también la disponibilidad de agua para uso y consumo humano. En este contexto, una de las prioridades en el manejo de las fuentes de agua es buscar sistemas de tratamiento sustentables que permitan contar con agua de calidad adecuada para el uso requerido (agrícola, potable, etc.).

Tabla 3. Producción agrícola en Michoacán.

<i>Principales productos agrícolas, 2009</i>	<i>Producción (Toneladas)</i>	<i>% en el total nacional</i>	<i>Lugar nacional</i>
<i>Fresa</i>	114 784	58.1	1° de 8
<i>Aguacate</i>	1 081 904	87.9	1° de 27
<i>Guayaba</i>	124 946	43.2	1° de 22
<i>Zarzamora</i>	112 310	96.9	1° de 10
<i>Durazno</i>	39 087	19.7	1° de 26
<i>Melón</i>	110 925	20.1	2° de 25
<i>Tomate rojo (jitomate)</i>	140 185	6.9	3° de 32
<i>Limón</i>	414 562	21.1	3° de 25

Los principales parámetros usados para determinar la calidad del agua son: pH, C.E., SDT, Dureza, cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), aniones (CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}), metales pesados, P, B y N-NH_4 . Ayers y Westcot (1989) y las NOM-CCA/032-ECOL/1993 y NOM-127-SSA1-1994 plantean los límites permisibles de estos parámetros para utilizarlos en la agricultura o para consumo humano. El conocimiento del nivel de los demás parámetros físico-químicos y químicos ayuda a determinar la calidad del agua y poder concluir si se necesita de algún tipo de tratamiento para disminuir los niveles presentes en el agua.

Sin embargo, el brindar un tratamiento a estas aguas para reducir estos elementos y poder obtener un agua de calidad, se necesita de un método de saneamiento efectivo entre los que se encuentran la ósmosis inversa y destilación solar; de acuerdo con CONAGUA (2011) éstos métodos están entre los de mayor efectividad para desalinizar agua.

En la actualidad las plantas de tratamiento de ósmosis inversa y destilación solar son costosas en consumo energético, por lo cual se propone utilizar paneles fotovoltaicos como fuente sustentable de energía y con ella alimentar dos prototipos desalinizadores de agua. Los prototipos se diseñaron partiendo de una producción a nivel laboratorio pero escalable a cualquier necesidad. Por último se construyó y evaluaron ambos dispositivos utilizando la metodología de evaluación de impacto ambiental llamada “Análisis de Ciclo de Vida (ACV)”.

1.8 Objetivos

1.8.1 Objetivo General

Desarrollar dos prototipos para el tratamiento de agua alimentados con energía solar y evaluar su capacidad desalinizadora en aguas salinas usadas en riego agrícola de la Ciénega de Chapala, Michoacán.

1.8.2 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades físico-químicas y químicas del agua subterránea utilizada en riego agrícola en la Ciénega de Chapala, Michoacán.
- Construir dos dispositivos desalinizadores para tratamiento de agua: ósmosis inversa y destilación solar.
- Evaluar los dos dispositivos mediante su capacidad desalinizadora, consumo energético, costos y análisis de ciclo de vida (ACV).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Este apartado se dividió en dos secciones para su realización:

- a. Selección de aguas a tratar y análisis de sus propiedades físico-químicas y químicas.
- b. Construcción y evaluación de los dispositivos. En esta parte se realizó primeramente la selección de materiales, mediciones, construcción, y análisis de ciclo de vida (ACV). Posteriormente, las aguas seleccionadas se sometieron a tratamiento con los dispositivos de ósmosis inversa y destilación solar y se determinó la eficiencia de cada sistema.

2.1 Muestreo de agua

El área de estudio se ubicó en el Distrito de Riego 024 Ciénega de Chapala, Michoacán. Figura 10.



Figura 10. Localización del Distrito de Riego 024.

Se realizaron muestreos de agua subterránea utilizada para riego agrícola en cinco municipios de la Ciénega de Chapala, Michoacán, comprendiendo 15 sitios: Venustiano Carranza (7 pozos profundos), Villamar (4 pozos), Sahuayo (1), Jiquilpan (1), Pajacuarán (1) y el Lago de Los Negritos. Este último sitio fue seleccionado debido a que es una fuente de agua extremadamente salina, de acuerdo con trabajos previos (Chávez *et al.*, 2010). Los sitios de muestreo se localizaron en los ejidos de Sahuayo, San Gregorio, Cotijarán, Pajacuarán, El Salitre, La Lobera, Ojo de Agua y La Palma, de los municipios mencionados.



Figura 11. Sitios de muestreo de agua subterránea en la Ciénega de Chapala, Michoacán.

2.2 Análisis físico-químicos y químicos del agua

En campo, se tomó un litro de agua de los sitios de muestreo seleccionados y se midió el pH y la conductividad eléctrica (CE). Las muestras de agua se almacenaron en botellas de plástico y se trasladaron al laboratorio donde se realizaron los análisis físico-químicos y químicos: pH (Potenciómetro marca Orion), C.E., sólidos disueltos totales (SDT) (Conductímetro marca Orion), Dureza (Titulación con EDTA), Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ (Absorción atómica), CO_3^{2-} , HCO_3^- (titulación con H_2SO_4) Cl^- (argentometría), SO_4^{2-} (turbidimetría), metales pesados disueltos Fe, Mn, Cu, Zn (Absorción atómica), P (persulfato), B (azomethina-H) y N- NH_4 (destilación kjeldahl).

Para la determinación de la relación de adsorción de sodio (RAS), se utilizó la ecuación de Ayers y Westcot (1989), la cual emplea para su cálculo a los cationes presentes en el agua. Ecuación 1.

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{((Ca + Mg)/2)}} \quad (1)$$

2.3 Construcción de los dispositivos de desalinización

2.3.1 Sistema de ósmosis inversa

Esta sección presenta el desarrollo y funcionamiento de un dispositivo de ósmosis inversa para tratar algunas de las muestras de las aguas subterráneas seleccionadas. La ósmosis inversa fue uno de los procesos elegidos por la eficiencia que brinda en calidad de agua (CONAGUA, 2011).

De acuerdo con Dévora *et al.* (2012) existen en México 435 plantas desalinizadoras con una capacidad instalada de 311,377 m³/d siendo este método el de menor gasto energético, con un consumo de 2 a 2.8 kwh/m³ y un costo de \$0.6 USD/m³. Los autores indican que este método tiene ventajas significativas ya que presenta un costo de producción relativamente bajo ante los demás procesos, emite menos CO₂ y es amigable con el ambiente.

Otra de las ventajas que presenta este método según Martínez *et al.* (2014), es que llega a remover partículas muy pequeñas en una solución, así como bacterias, sales, azúcares, proteínas, partículas, tinturas y otros constituyentes. La tecnología de OI es capaz de reducir el nivel de sales hasta 100 veces (Vera y Pan, 2009).

Con la utilización de este proceso se espera obtener un agua que se encuentre dentro de los rangos establecidos por las NOM-CCA/032-ECOL/1993 para uso agrícola, NOM-127-SSA1-1994 para uso y consumo humano y lo que Ayers y Westcot (1989) establecen como nivel de peligrosidad de agua bajo, utilizando la energía solar fotovoltaica como fuente de alimentación para operar el dispositivo. Se utilizó un purificador de agua de OI Modelo R-300-5, el cual se modificó para poder ser instalado y operado en cualquier lugar.

Actualmente, el obtener agua de calidad adecuada para los diversos usos ha tomado importancia, principalmente en lugares áridos y semiáridos donde se

tienen fuertes problemas de disponibilidad hídrica. En la actualidad existen una gran variedad de trabajos de investigación relacionados con la ósmosis inversa y la aplicación de energía fotovoltaica a ésta. Un ejemplo es Cottier (2011), el cual en su estudio muestra los alcances que se pueden tener al desalinizar agua con una planta de ósmosis inversa alimentada con energía solar y concluye, al igual que Lee *et al.* (2011) que la utilización de esta tecnología resulta factible para solucionar el problema de escasez ya que puede operar con una amplia gama de fuentes de agua. También Thomson y Infield (2005) usaron el proceso de OI para desalinizar agua del mar utilizando paneles solares con pruebas a nivel laboratorio; en su arreglo fotovoltaico no utilizaron baterías ya que en la zona donde se tenía pensado instalarlo cuenta con alta incidencia de radiación solar, además que su utilización provocaría problemas costo-eficiencia. El sistema desarrollado tiene una potencia de 2.4 kwp y una producción de agua tratada de 3 m³/d.

Otro trabajo con el método de OI es el de Herold y Neskakis (2001), que consistió en desalinizar agua de mar mediante OI implementando la energía fotovoltaica; su investigación consistió en la instalación de una pequeña planta de OI con una producción promedio de 0.8 a 3 m³/d, con un consumo energético de 4.8 kwp y con energía almacenada de 60 kwh en el arreglo de baterías. También se han realizado trabajos con sistemas energéticos combinados, como es el caso de Kershman *et al.* (2003), quienes desarrollaron un sistema combinado de energía eólica y solar teniendo una producción de 300 m³/d y con una potencia de 320 kwh.

La mayoría de estos trabajos que hablan sobre el objetivo de utilizar el método de OI para desalinizar agua, se basan en los resultados de producción y consumo energético. Este trabajo muestra un estudio similar a los anteriores en el cual se implementó el sistema fotovoltaico, además de los análisis físico-químicos pre y post tratamiento para observar la calidad del agua.

2.3.1.1 Principales componentes de la ósmosis inversa

La primera parte es el sistema de bombeo, el cual consta de paneles fotovoltaicos(1), bomba hidráulica (2) y el pozo profundo (3), la cual envía el agua directamente hacia la bomba booster (4); ésta cuenta con la característica de aumentar la presión del flujo de agua hasta 120 psi. La presión necesaria para hacer funcionar la membrana de la ósmosis inversa es de 40 psi. Una vez pasando por la bomba booster, el agua es enviada al sistema de ósmosis inversa (5), cruzando por todos los filtros que tiene el sistema hasta llegar al tanque de agua tratada (6). Sin embargo, no toda el agua es tratada y una parte es dirigida al desagüe y se devuelve al pozo nuevamente (3). El diagrama del proceso se muestra en la Figura 12.

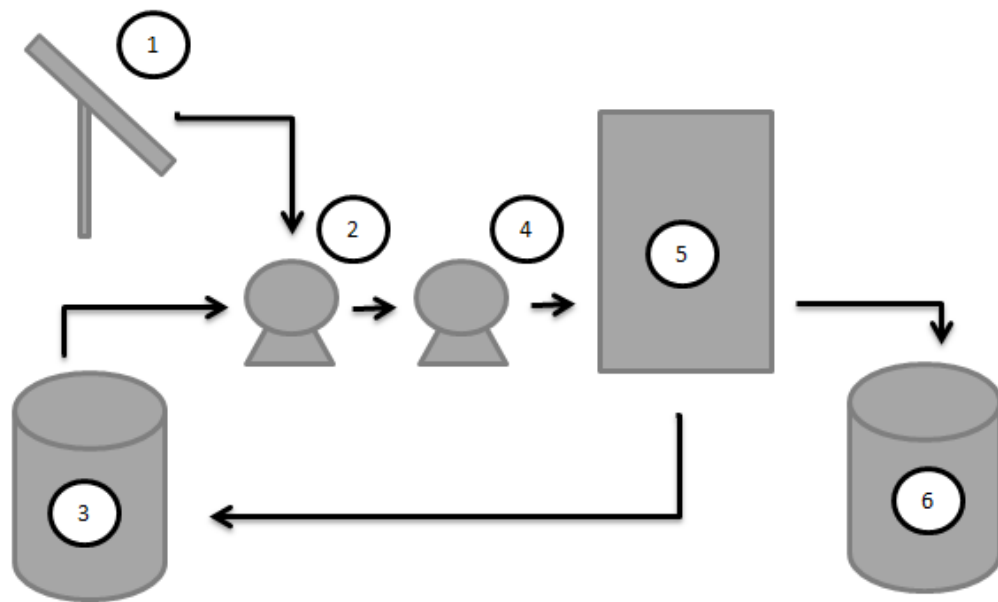


Figura 12. Diagrama de funcionamiento del dispositivo de ósmosis inversa.

El sistema de ósmosis inversa está constituido por un sistema de tratamiento de 5 etapas, los cuales son los siguientes:

Etapa 2 (E2)

Filtro de carbón de (2x10) in. Es usado por su eficiencia en la remoción de cloro, mal olor y sabor del agua, así como metales pesados como el plomo y mercurio en el agua.

Etapa 3 (E3)

Filtro de carbón block de (2x10) in. Este filtro es más fino y ayuda a retener partículas aún más pequeñas.

Etapa 4 (E4)

Esta etapa es el corazón del dispositivo, la membrana semipermeable de la ósmosis inversa. Existen en la actualidad gran variedad de modelos de membranas y las más utilizadas son las membranas en espiral Figura 13; ésta se compone por una malla espaciadora, el material que conforma la membrana y una guía. La composición que lleva este tipo de membrana provoca que se obtenga en el tratamiento dos tipos de agua: agua de rechazo y el agua tratada (Cottier, 2011). El material que conforma la membrana se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Materiales que conforman la membrana semipermeable en el sistema de ósmosis inversa.

<i>Número de capas</i>	<i>Material</i>	<i>Porosidad</i>	<i>Características</i>
1	Poliéster	Mayor porosidad	Sirve de base a la membrana
2	Polisulfona	Microporosa	Capa intermedia
3	Poliamida	Ultra delgada	Separa el agua de alimentación en los flujos de agua tratada y agua de rechazo.

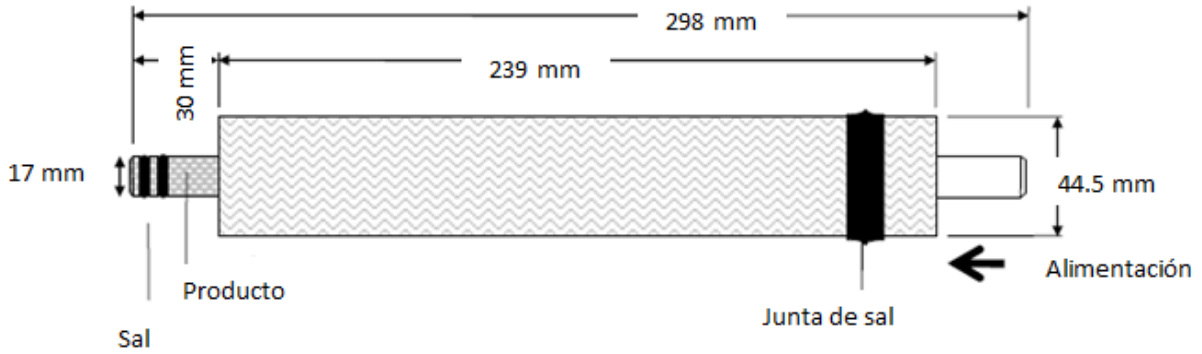


Figura 13. Membrana semipermeable espiral.

Las características de esta membrana se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Rangos de operación de la membrana semipermeable.

<i>Tipo de membrana</i>	Poliamida compuesta de una película delgada
<i>Temperatura Máxima de operación</i>	45°C
<i>Presión máxima de operación</i>	150 psig
<i>Tasa máxima de alimentación</i>	7.6 L/min
<i>Rango de pH</i>	2 a 11
<i>Índice de densidad máxima de alimentación limosa</i>	5
<i>Tolerancia al cloro</i>	< 0.1 ppm

Etapa 5 (E5)

En esta etapa se encuentra un filtro de carbón con cáscara de coco, para darle buen sabor al agua.

Otro aditamento que tiene el sistema de ósmosis inversa es un tanque de almacenamiento, utilizado para enviar una mayor cantidad de agua al filtro de la etapa 5. El sistema de OI se muestra en la Figura 14.

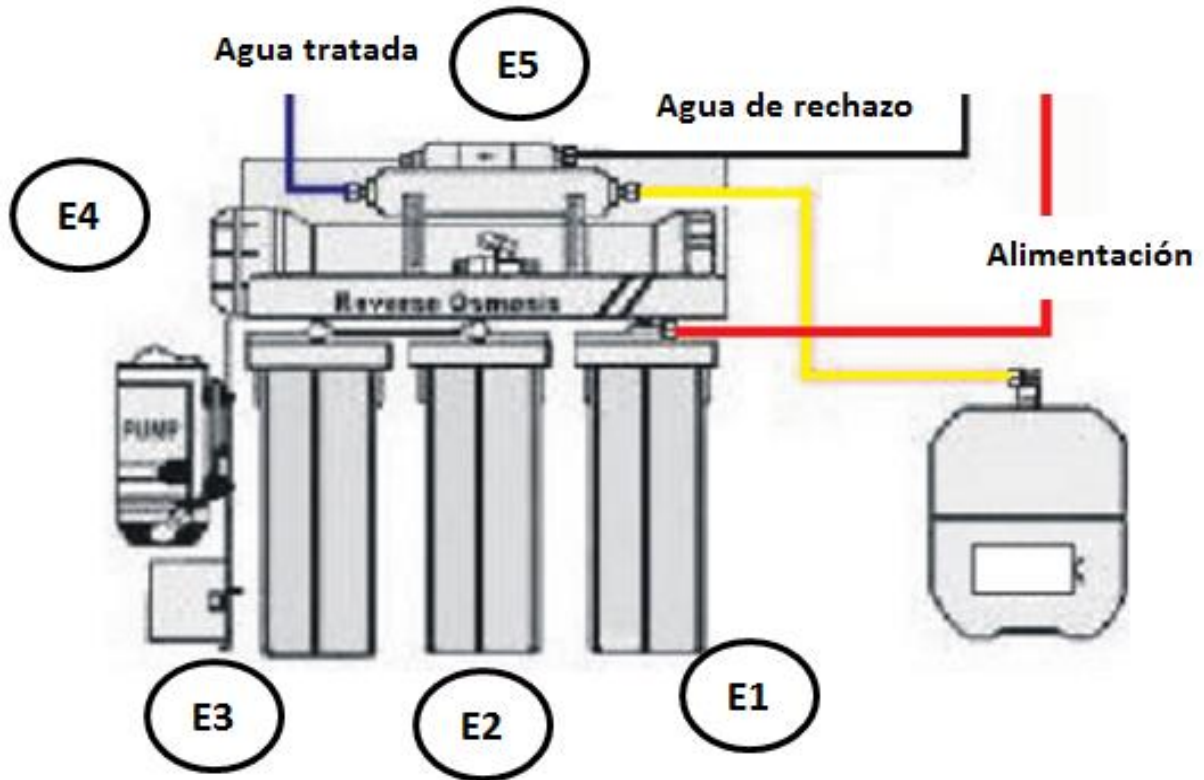


Figura 14. Proceso de ósmosis inversa.

2.3.1.1 Dimensionamiento

Dimensionamiento fotovoltaico

Para el dimensionamiento fotovoltaico, fue necesario conocer los tipos de paneles y capacidades de bombas que existen en el mercado. Para el correcto funcionamiento del dispositivo de ósmosis inversa, es necesario alimentar energéticamente la bomba hidráulica y la bomba booster buscando que el rango de energía eléctrica producida por los paneles sobrepase al de operación del dispositivo y así elevar su vida útil.

La configuración del sistema fotovoltaico se realizó en paralelo para aumentar la intensidad, como se muestra en la Figura 15.

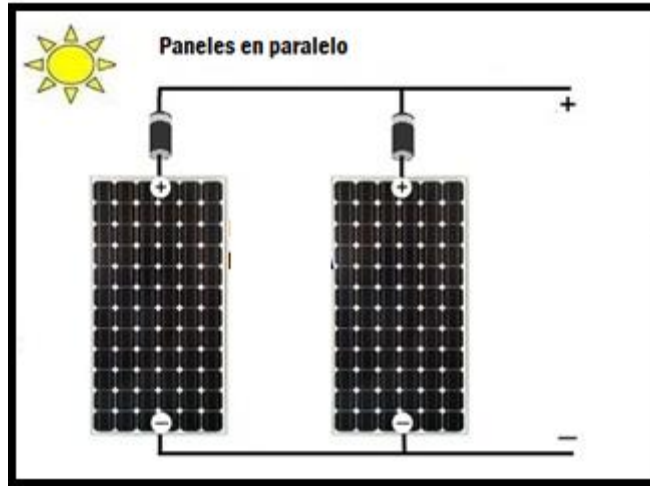


Figura 15. Configuración electrónica de los paneles fotovoltaicos.

Las características de los paneles fotovoltaicos se muestran en la Tabla 6. Es necesario garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo aún en condiciones climáticas poco favorables.

Tabla 6. Características de un panel fotovoltaico.

<i>Poder de salida máximo</i>	250 w
<i>Número de celdas</i>	60(6x10)
<i>Voltaje de circuito abierto (Voc)</i>	37.85 VCD
<i>Voltaje de operación óptima (Vmpp)</i>	30.12VCD
<i>Corriente de circuito cerrado (Isc)</i>	8.65 A
<i>Corriente de operación óptima (Impp)</i>	8.30A
<i>Temperatura de operación</i>	(-40 a +90) °C
<i>Resistencia</i>	600 VCD
<i>Dimensiones del panel</i>	(1640 x 992 x 40) mm
<i>Field wiring</i>	cobre de 12 AWG
<i>Peso</i>	18.5 kg

Para la conexión del sistema fotovoltaico fue necesario de los siguientes elementos adicionales

- Un tempo control como el que se muestra en la Figura 16. Este dispositivo se encargada de regular el voltaje de entrada, en este caso de 36v a 12v para la salida, conectando los cables de los paneles en sus terminales.



Figura 16. Tempo control.

- Una batería de 19 celdas a 12v. La batería es importante en la instalación del equipo fotovoltaico debido a que ella evita la posible sobrecarga o deficiencia eléctrica que un dispositivo pueda tener; envía de manera constante el voltaje y corriente necesario. La batería (Figura 17) es cargada eléctricamente por los paneles gracias al tempo control y a la vez está es conectada al inversor.



Figura 17. Batería de 19 celdas.

- Un inversor de corriente de (12-110) v, Figura 18. Este aparato realiza la conversión de corriente directa de los paneles a corriente alterna que necesitan los dispositivos de bombeo. La conexión va a las terminales hacia la batería.



Figura 18. Inversor de corriente (12-110) v.

El diagrama del sistema fotovoltaico se muestra en la Figura 19. El voltaje de salida de los paneles FV (1) es de 36 V, y el inversor de corriente es de (12-110) V; el siguiente componente es un tempo control (2), los cuales tienen la característica de poder regular el voltaje de salida y poder bajarlo de 36 hasta 12 volts, de esta manera se evitará la sobrecarga de la batería (3) y el cortocircuito del inversor (4). El Inversor tiene la función de cambiar la corriente directa que entregan los paneles a corriente alterna con la cual funcionan la mayoría de los dispositivos convencionales, incluyendo las dos bombas que se necesitan para operar la ósmosis inversa.

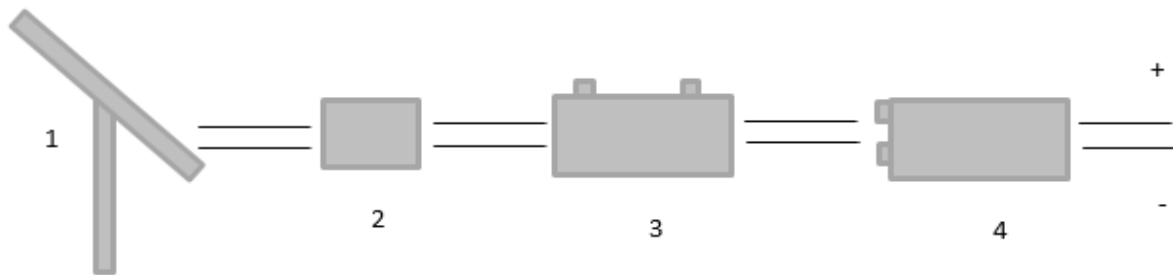


Figura 19. Diagrama del sistema fotovoltaico.

El dimensionamiento fotovoltaico requiere conocer la potencia del arreglo fotovoltaico para hacer funcionar el dispositivo, por lo cual conocer la energía media consumida (E_{media}) por día, la eficiencia del panel (η_{panel}) y las horas de operación del dispositivo (H_{op}), es importante para realizar este cálculo.

Para $P_{arreglo}$ se utilizó la fórmula extraída de Cottier (2011) la cual se muestra en Ecuación 2.

$$P_{arreglo} = \frac{E_{media}}{(\eta_{panel})(H_{op})} \quad (2)$$

Para E_{media} , se revisó la potencia de las bombas que se van a utilizar, las cuales para este dispositivo son dos; una de 186.5 wh y la otra de 19.2 wh por día.

Teniendo la potencia que necesita el dispositivo, se calculó el número de paneles necesarios ($N_{paneles}$) dividiendo $P_{arreglo}$ entre la potencia del panel (P_{panel}), como se muestra en la Ecuación 3.

$$N_{paneles} = \frac{P_{arreglo}}{P_{panel}} + 1 \quad (3)$$

Conociendo $N_{paneles}$ se realizó el análisis del sistema fotovoltaico, se analizó la ficha técnica de cada panel, los cuales se muestran en la Tabla 6.

Por último, para obtener la potencia del sistema fotovoltaico ($P_{paneles}$) se utiliza la Ecuación 4, sustituyendo los valores obtenidos.

$$P = V_{total}I_{total} \quad (4)$$

Para conocer el tipo de conexiones que se deben de realizar en el arreglo fotovoltaico se requirió el conocimiento previo de los siguientes parámetros:

- Número de paneles.
- Configuración electrónica.
- Potencia final.

Ya conociendo estos parámetros se prosiguió a realizar la construcción del sistema de bombeo.

El diagrama de construcción consistió primeramente en realizar todos los ajustes y conexiones necesarias. Figura 20.



Figura 20. Cables sin conexiones.

Después se realizaron las mediciones correspondientes a los paneles mediante un multímetro digital marca Fluke. Se obtuvo un voltaje de salida de 33.8 v con ligeras variaciones de +/- 2 v. Figura 21.



Figura 21. Mediciones en los paneles.

Una vez teniendo los paneles caracterizados y las conexiones debidas, se prosiguió a la construcción de una base para el sistema fotovoltaico y así facilitar su manejo y transporte. Figura 22.

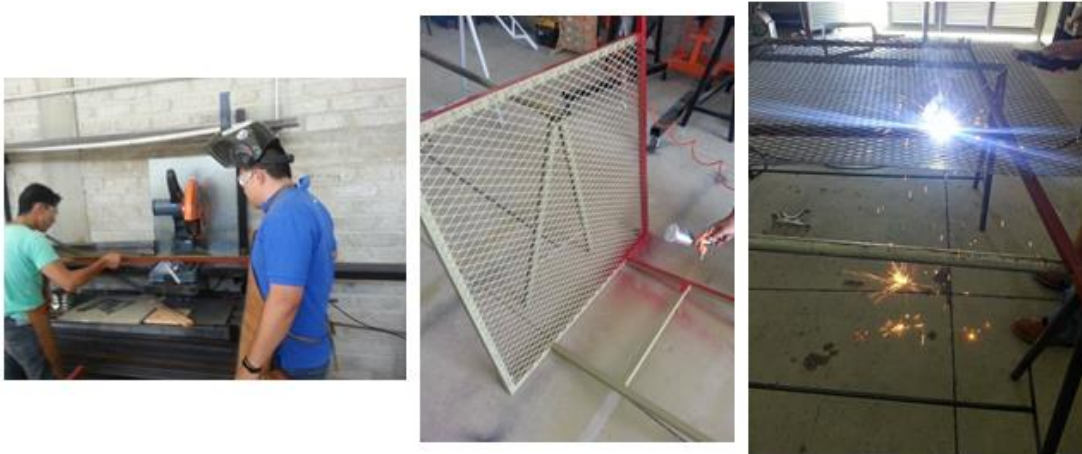


Figura 22. Construcción del sistema Fotovoltaico.

Por último se fijaron a una base a 21° para su máximo aprovechamiento de energía solar, éste es el ángulo de inclinación recomendado cuando no se cuenta con un sistema de seguimiento solar. Figura 23.



Figura 23. Paneles fijados.

Comportamiento de permeado de la ósmosis inversa

Como se mencionó con anterioridad, la membrana semipermeable es el corazón del dispositivo de OI. Para conocer la forma de operación de la membrana es necesario analizar el tipo de agua a utilizar, el nivel de sales y la temperatura que presenta; éstos son parámetros fundamentales para determinar la Presión osmótica (P_{osm}) necesaria para permear el agua a través de la membrana. Generalmente estos datos tienen unidades de miligramos por litro o partes por millón. Para calcular P_{osm} , se utilizó la ecuación de Van't Hoff la cual multiplica la concentración molar (C), la Temperatura (T) en grados kelvin y la constante de los gases ideales (R) en litros bares por kelvin, como se muestra en la Ecuación 5.

$$P_{osm} = (C)(R)(T) \quad (5)$$

Para determinar la P_{osm} se usa la Ecuación 6 en donde primeramente se obtiene el número de moles, el cual es la resultante de la división de la masa del compuesto entre la masa molecular:

$$\text{Número de moles} = \frac{\text{Masa del compuesto}}{\text{Masa molecular}} \quad (6)$$

Por último se aplica la Ecuación 7 para conocer la C se divide el número de moles entre el volumen (V).

$$C = \frac{\text{Número de moles}}{V} \quad (7)$$

Cuando se realiza la compra de una membrana semipermeable, el fabricante añade un documento donde desglosa las características que tiene el modelo de membrana del equipo vendido, mostrando parámetros como flujo de permeado, presión necesaria a aplicar, rechazo de sales, etcétera. Por otra parte para determinar la eficiencia que presenta el dispositivo de OI (η_{OI}) es necesario determinar el flujo de permeado de la membrana (F) y después compararlo con el que presenta el fabricante, Ecuación 8.

$$\eta_{OI} = \frac{\eta_{teorica}}{\eta_{empirica}} \quad (8)$$

Para determinar F se utilizó la Ecuación 9, donde se multiplica el área de contacto (A), el coeficiente de permeabilidad (S) y la diferencia entre la presión del sistema (P_{sis}) y P_{osm} .

$$F = (A)(S)(P_{sis} - P_{osm}) \quad (9)$$

2.3.1.2 Construcción general del sistema

El diagrama de funcionamiento del dispositivo de ósmosis inversa se muestra en la Figura 24. Consta de un sistema de bombeo, el cual está formado por el arreglo fotovoltaico (1), la bomba hidráulica (2) y el pozo profundo (3), de ahí el agua pasa directamente hacia la bomba booster (4) que cuenta con la característica de aumentar la presión del flujo de agua hasta 120 psi. La presión necesaria para hacer funcionar la membrana de la ósmosis inversa es de 40 psi. Una vez pasando por la bomba booster, el agua es enviada al sistema de ósmosis inversa (5), cruzando por todos los filtros que tiene hasta llegar al tanque de agua tratada (6). Sin embargo, no toda el agua es tratada y una parte es dirigida al desagüe para devolver el fluido al pozo nuevamente.

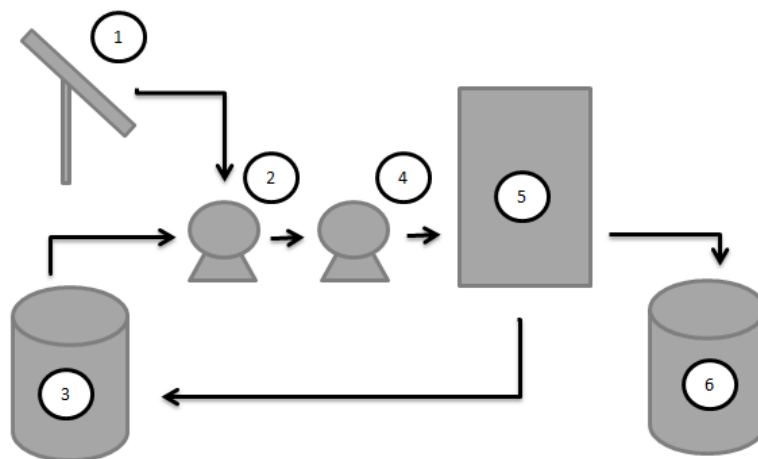


Figura 24. Diagrama de funcionamiento del dispositivo de ósmosis inversa (OI).

La cubierta del dispositivo de ósmosis inversa se diseñó para que sea portátil y pueda ser montado en cualquier parte, así como mantenerlo protegido y minimizar los daños que causa la intemperie. Por esta razón se pensó en un diseño rectangular para facilitar la construcción. El material con el cual se construyó fue: madera MDF de 1.27 in, como cubierta y ángulo de 2.54 in como estructura. El diseño se muestra en la Figura 25.

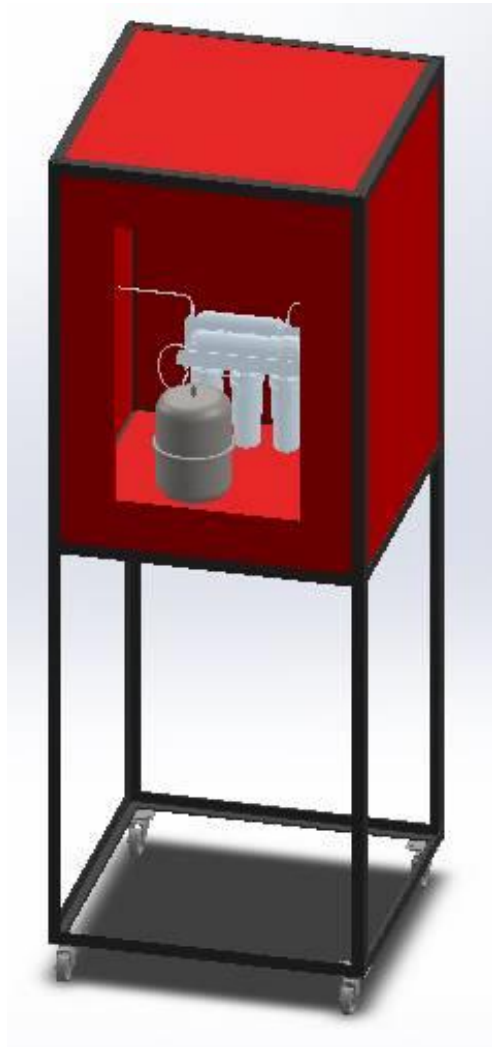


Figura 25. Cubierta del dispositivo de ósmosis inversa.

Ya teniendo el diagrama de funcionamiento y el diseño se comenzó a construir la cubierta del dispositivo. Se cortó el MDF, se hizo la estructura, se le hicieron las

conexiones necesarias para su correcto funcionamiento, se le colocaron unas llantas en la parte inferior y se prosiguió a pintar. Figura 26.



Figura 26. Construcción de la cubierta del dispositivo de ósmosis inversa.

2.3.2 Destilador solar

Este capítulo presenta el desarrollo y funcionamiento de un destilador solar utilizado para tratar las aguas subterráneas seleccionadas. El destilador solar fue uno de los procesos elegidos por la eficiencia que brinda en la obtención de agua de buena calidad, de acuerdo con CONAGUA (2011).

Entre los métodos no convencionales para tratar agua contaminada, el más destacado es la destilación solar (DS). En comparación con las otras tecnologías la DS puede ser operada por cualquier persona por su sencillez y requiere de poco mantenimiento (Tiwari *et al.*, 2003). Al-Hayeka y Badran (2004) aseguran que la DS elimina impurezas, sales, metales pesados y elimina microorganismos llegando a obtener un agua con mayor calidad que el agua de lluvia.

Fath (1998) menciona que con la utilización de la DS en aguas salinas y agua de mar, se puede llegar a obtener agua potable y con esto satisfacer los requerimientos hídricos de una sociedad y a la vez ser amigables con el medio. Por otra parte también existen críticas sobre la utilización de este método como el de Rajvanshi (1981), quien menciona que este proceso presenta inconvenientes que lo hacen técnica y económicamente poco atractivo para su despliegue a gran escala, ya que requieren lavados para quitar sales, mantener un nivel preciso de agua para tener un flujo constante de agua tratada además de tener una dependencia de las condiciones climáticas del lugar.

Con la utilización de este proceso de destilación solar se espera obtener un agua que se encuentre dentro de los rangos establecidos por las NOM-CCA/032-ECOL/1993 para uso agrícola, NOM-127-SSA1-1994 para uso y consumo humano y lo que Ayers y Westcot (1989) establecen como nivel de peligrosidad de agua bajo, utilizando la energía solar fotovoltaica como fuente de alimentación para operar las bombas que proveen de agua al dispositivo.

La desigual distribución hídrica en el mundo ha generado diversos conflictos sociales, razón por el cual se han generado diferentes dispositivos y plantas con distintos procesos de tratamiento para así poder proveer de las necesidades de este recurso, uno de ellos es la destilación solar (DS). Statistik (2014), en su investigación reporta los resultados que logró al construir un DS para desalinizar agua de mar, con un diseño de un panel plano hecho a base de tubos de cobre donde obtuvo una producción de 1092 g/m^2 y con una incidencia de radiación promedio de 728 w/m^2 ; el autor menciona que esta tecnología aunque se encuentre en constantes mejoras presenta baja eficiencia.

Esteban *et al.*, (2010), realizaron una investigación donde compararon tres tipos de destiladores, un destilador con colector solar acumulador, un destilador tipo batea y otro tipo plano, en sus resultados observaron como el de acumulador solar tuvo mayor producción que los otros obteniendo alrededor de 2.8 kg/m^2 diario, concluyeron que la eficiencia depende del área de captación. Del mismo modo, Sodha *et al.*, (1981) desarrollaron un destilador solar tipo plano en el cual se

puede regular su inclinación para tener una óptima incidencia de radiación. En un día soleado normal ellos obtuvieron una producción media de 2.5 kg/m², la eficiencia que tuvo fue del 34% que comparada con la eficiencia del destilador solar tipo cuenca fue más alto.

Este tipo de trabajos resultan viables en zonas donde no se cuenta con suficiente agua potable. Akash *et al.* (2000) mencionan la importancia de este tipo de trabajo para poder proveer de agua potable en lugares áridos donde el transporte de esta resulta costoso. Los autores analizaron un destilador tipo cuenca el cual tuvo una producción de 0.4 kg/m² por día.

El diseño de mayor popularidad en DS es el tipo cuenca, razón por el cual se construyó un dispositivo preliminar con esas características, con la finalidad de observar las ventajas y desventajas que presentan estos dispositivos y a partir de los resultados construir otro mejorado. Además, otro aporte que presenta esta investigación es que se realizaron los análisis físico-químicos y químicos de las aguas seleccionadas, antes y después del tratamiento, observando así la eficiencia del dispositivo, no solo en producción sino también en calidad.

2.3.2.1 Partes destilador solar preliminar

Para la construcción de este dispositivo fue necesaria la construcción de un dispositivo preliminar, esto para observar las eficiencias y deficiencias. De este primer dispositivo se derivó la construcción de un segundo dispositivo mejorado. La primera parte del destilador solar es el sistema de bombeo (1) (2) (3), el cual hace llegar el agua al tanque de almacenamiento (4), de ahí pasa al DS (5) el cual mediante el calentamiento del agua se aprovecha la evaporación del agua que pasa por la garrafa de agua instalada en la parte superior, de ahí el vapor se condensa hasta pasar al tanque con agua destilada (6) Figura 27.

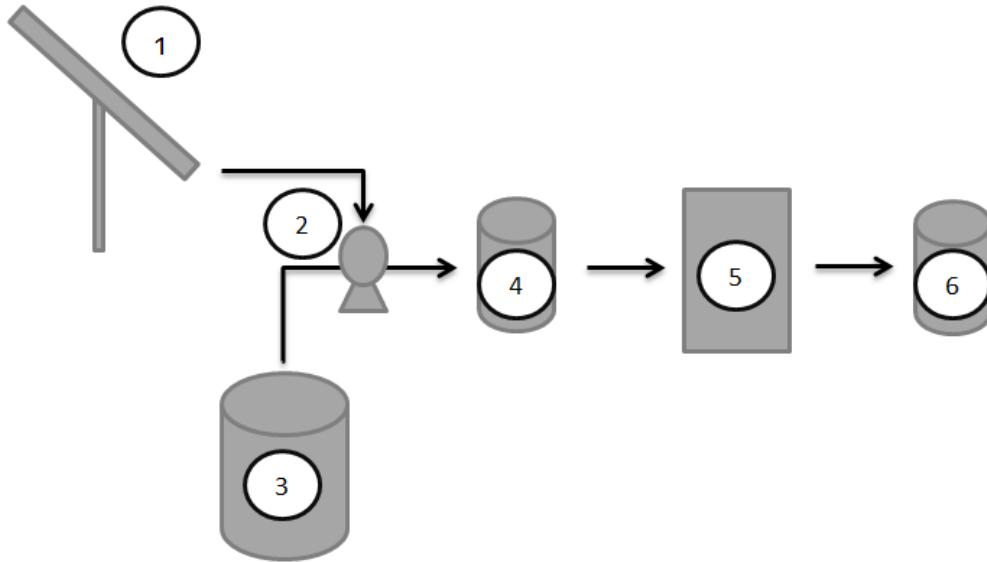


Figura 27. Diagrama de funcionamiento del destilador solar.

Para la construcción del destilador solar, primeramente se realizó un diseño preliminar con la finalidad de observar el comportamiento del agua y la eficiencia de los componentes que se piensan utilizar.

El primer DS consta de las piezas¹ que se muestran en la Figura 28.

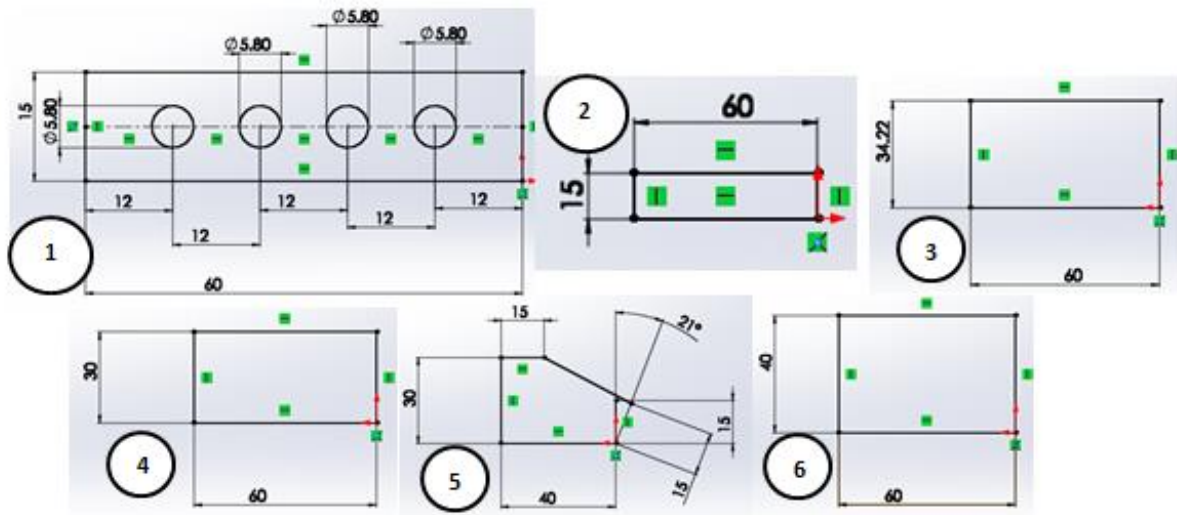


Figura 28. Partes del destilador preliminar.

¹Las medidas de las piezas son en centímetros (cm).

1. Una pieza frontal, la cual lleva cuatro orificios para cuatro tubos al vacío.
2. Una pieza superior. Esta lleva una abertura permitiendo el acceso dentro del recipiente para poder repararlo o manipularlo.
3. Una cubierta de vidrio de 3 mm de espesor.
4. Una parte posterior.
5. Dos piezas laterales; en la pieza derecha lleva un pequeño orificio donde pasa la condensación y pasa hacia el tanque de almacenamiento de agua destilada.
6. Una base.

El material de estas piezas fue de acrílico de 3 mm de espesor unido con silicón frío. El material de la cubierta es de vidrio de 3 mm de espesor. Se colocó una válvula Jack dentro del depósito con la finalidad de regular el nivel del agua, se unieron las piezas y se le puso los cuatro tubos al vacío como se muestra en la Figura 29.

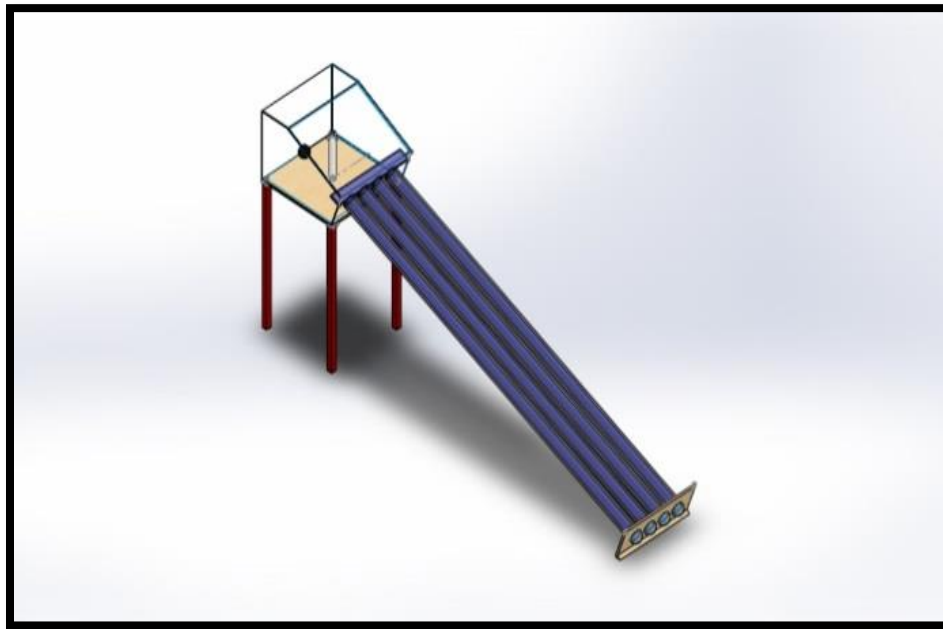


Figura 29. Destilador preliminar.

Al medir el volumen de agua que contiene el recipiente, se observó que era una masa muy grande por lo cual en el proceso de construcción se optó por modificar

la pieza frontal y colocar un orificio extra para otro tubo al vacío y así poder elevar la temperatura.

2.3.2.2 Dimensionamiento

2.3.2.2.1 Dimensionamiento fotovoltaico

Para poder operar el DS se necesita alimentar de energía eléctrica la bomba hidráulica, en este caso de $\frac{1}{4}$ de HP de potencia. La configuración electrónica de los paneles fue la que se muestra en la Figura 15, utilizando los paneles con características de la Tabla 6. Para conocer la $P_{arreglo}$ se utilizó la Ecuación 2, después se usó la Ecuación 3 para conocer $N_{paneles}$, por último se utilizó las Ecuaciones 4 para saber la potencia total que tienen los paneles.

2.3.2.2.2 Comportamiento térmico

Para determinar el comportamiento térmico, se necesitó calcular cuánto calor (Q) hay que suministrar al agua para elevar su temperatura (T) de 20 °C considerada en esta investigación como temperatura ambiente a 100°C, para dicho cálculo se utilizó la ecuación de calor, la cual en este caso es el resultado del producto de la masa de agua (m), el calor específico (Cp) y la diferencia de temperatura final e inicial (ΔT), como se muestra en la Ecuación 10.

$$Q = mCp\Delta T \quad (10)$$

Sin embargo, se requirió conocer la razón de flujo de calor (\dot{Q}), mediante el producto de la incidencia de radiación (I_c) por unidad de área (A), por lo cual se utilizó la Ecuación 11.

$$\dot{Q} = AI_c \quad (11)$$

Entonces, para conocer el Q que se necesita para elevar la T del agua en cierto tiempo (t) y con ciertas condiciones de I_c y A , fue necesario igualar las Ecuaciones 10 y 11, pero para poder hacer esto es necesario derivar la Ecuación 10 ya que la Ecuación 11 es la razón de flujo de calor y la derivada es una razón de cambio, como se observa a continuación:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$$

Se derivó con respecto al tiempo, se aplicaron los despejes debidos y simplificaciones, de lo cual se obtuvo:

$$AI_c t = mCp(T_2 - T_1)$$

Por último se despejó la temperatura final (T_2):

$$T_2 = T_1 + \frac{AI_c}{mCp} t$$

Conociendo la T_2 que se tuvo en el dispositivo en cierto lapso de t , se pudo saber el comportamiento térmico que presentó y de tal manera conocer si el dispositivo es operable en esta zona.

Para poder dimensionar el dispositivo a cualquier tamaño y obtener una producción deseada, se partió de un diseño de un DS con colección solar mediante tubos al vacío. Primeramente se determinó la eficiencia de los tubos ya que son el principal componente del dispositivo. En la Figura 30 se muestra el comportamiento que presenta un tubo al vacío, en ella se explica como la eficiencia es más alta al calentar agua de menor temperatura y entre mayor temperatura se requiera la eficiencia de los tubos decrece. Se seleccionó la eficiencia que presentó al calentar agua a 100 °C debido a que es la temperatura teórica en cual el agua pasa de estado líquido a vapor. La eficiencia de los tubos (η_{tubos}) a 100 °C fue considerada del 0.3%.

Para obtener el calor existente dentro de cada tubo (Q_{util}), fue necesario multiplicar η_{tubos} en 100 °C por la radiación incidente en el DS (Q_{in}) considerado de manera teórica de 1000 w/m² como se muestra en la Ecuación 12:

$$Q_{util} = (\eta_{tubos})(Q_{in}) \quad (12)$$

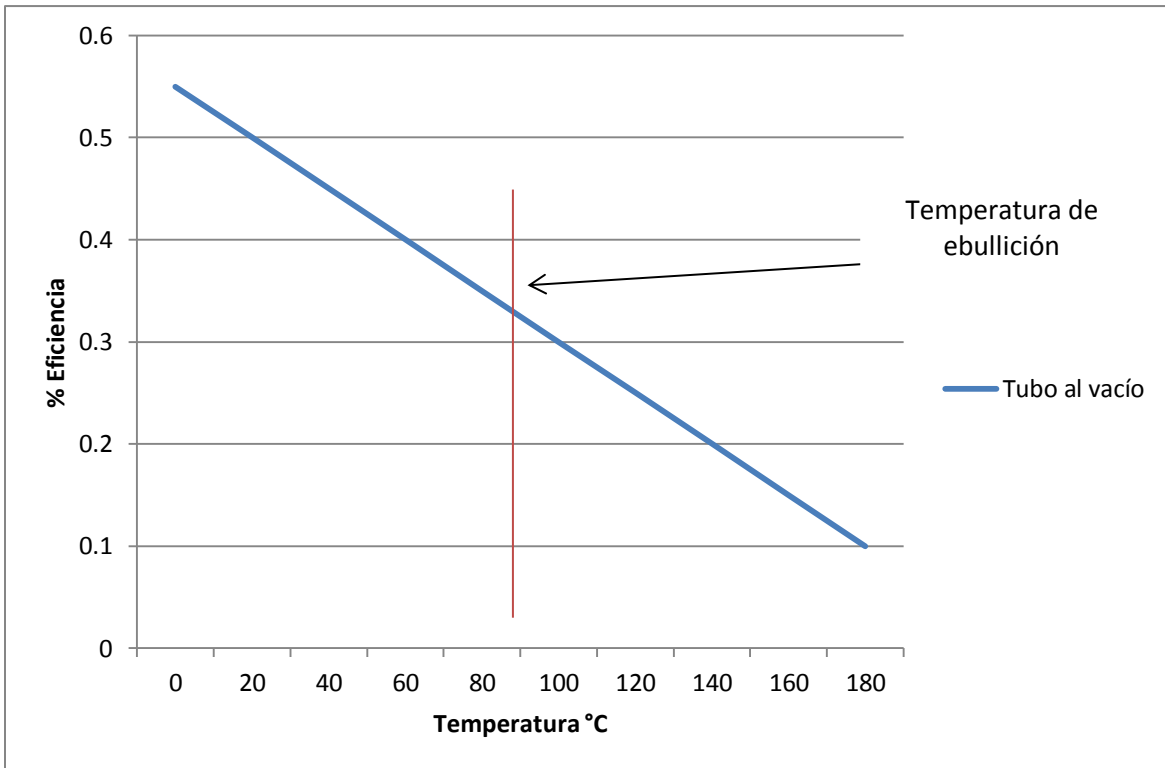


Figura 30. Eficiencia térmica de un tubo al vacío.

Una vez teniendo el valor de Q_{util} se multiplicó por el tiempo de radiación (t_{rad}) en segundos las cuales en esta investigación se abordó el lapso de 8:00 a las 16:00 horas, siendo este el tiempo donde se presenta mayor incidencia de radiación al día, de este modo se pudo obtener el calor total Q_T que requieren los tubos al vacío para evaporar agua de temperatura ambiente a 100°C, Ecuación 13.

$$Q_T = (Q_{util})(t_{rad}) \quad (13)$$

Ya con el valor de Q_T fue necesario calcular el calor que necesita el agua para pasar de líquido saturado a vapor saturado (Q_{agua}), para lo cual se consultaron las tablas de agua saturada de Cengel y Boles (2006), donde se calculó la diferencia de la entalpía de vapor saturado a 100°C y la entalpía de líquido saturado a 20°C como se aprecia en la Ecuación 14.

$$Q_{agua} = h_g @ 100^\circ C - h_f @ 20^\circ C \quad (14)$$

Por último, se aplicó la Ecuación 15 para obtener la masa (m) o la producción total que tiene el dispositivo con los parámetros mencionados.

$$m = \frac{Q_T}{Q_{agua}} \quad (15)$$

Al tener la masa teórica y la masa empírica m_E se puede obtener la eficiencia del DS con la Ecuación 16.

$$\eta_{DS} = \frac{m_E}{m} \quad (16)$$

2.3.2.3 Construcción del destilador solar preliminar

Para la construcción del dispositivo, se cortaron todas las partes, se unieron con silicón, se colocó la válvula Jack, se montaron los cinco tubos al vacío, se pintó y armó por completo. El proceso de construcción se muestra en la Figura 31.

A partir de aquí se observó la temperatura máxima promedio que alcanza el agua y eficiencia y se elaboró la Tabla 7 recopilando la información obtenida.

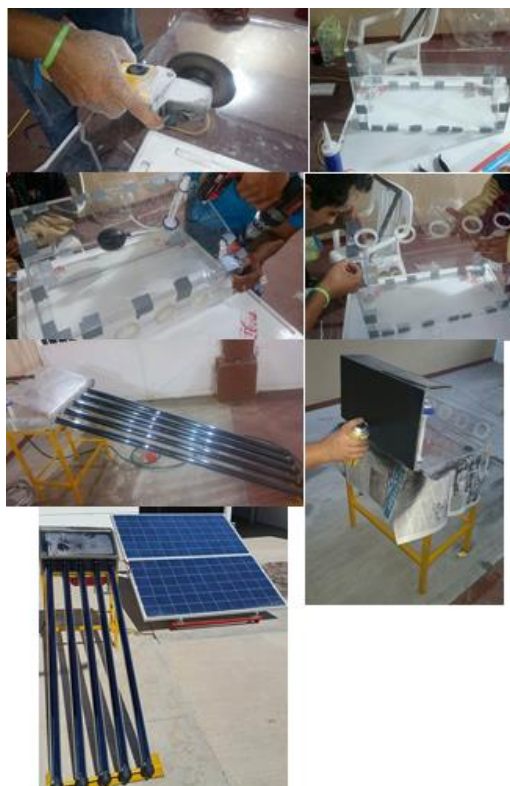


Figura 31. Construcción del destilador solar preliminar.

Tabla 7. Eficiencias y deficiencias del destilador preliminar.

<i>Eficiencias</i>	<i>Deficiencias</i>
<i>Fácil operación, instalación y construcción</i>	Al contener una masa de agua grande necesita de mayor cantidad de calor
<i>Los tubos logran proporcionar calor al agua suficiente para condensarla</i>	Las pérdidas de calor son mayor que las entradas, se logró una producción media de 0.23 Kg/m ² por día
	No hay suficiente condensación
	Con el tiempo llega a presentar fugas

2.3.2.4 Construcción del destilador solar final

A partir de las observaciones vistas en la Tabla 7 se realizó un segundo dispositivo subsanando las deficiencias vistas. Se optó por un dispositivo final con las siguientes características:

Un recipiente, cinco tubos al vacío y una salida de vapor; como se muestra en Figura 32.

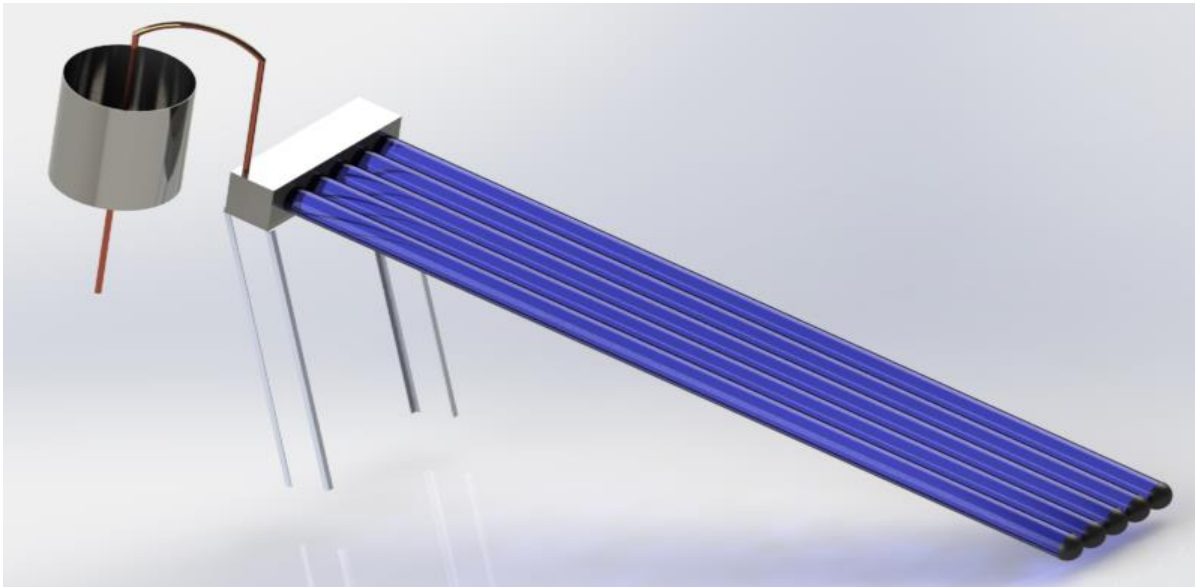


Figura 32. Destilador solar final.

2.3.2.4.1 Principales componentes del destilador solar

El destilador solar está constituido por 5 tubos al vacío de longitud 1.8 m de largo por 58 mm de diámetro, un cabezal de acero inoxidable, una garrafa de aire al cual se le conectó un tubo de cobre flexible de 0.95 cm de diámetro y 2 m de largo y un bote de aluminio como sistema condensador. Las especificaciones de los tubos al vacío se muestran en la tabla 8.

La parte de mayor importancia en el DS son los tubos al vacío. Los tubos al vacío cuentan con una primer capa de cristal de borosilicato transparente el cual permite el paso de la radiación, una segunda capa de aire 2mm y una tercera capa constituida de (Co/Al-N/Al); este material tiene la capacidad de retener el calor debido al color y sus constituyentes, disminuyendo así las pérdidas de calor por

convección. Otra parte importante es la capa de aire la cual provoca un efecto invernadero².

Tabla 8. Especificaciones de los tubos al vacío.

<i>Material</i>	Cristal de borosilicato 3.3
<i>Longitud/diámetro</i>	1.8m/58mm
<i>Recubrimiento</i>	Tricapa (Co/Al-N/Al)
<i>Expansión térmica</i>	$3.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$
<i>Coefficiente lineal de pérdidas de calor</i>	$\leq 0.8 \text{ W (m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$
<i>Resistencia a la presión</i>	0.05 Mpa (0.56 kg/m ²)
<i>Resistencia al granizo</i>	De hasta 25 mm de diámetro

2.3.2.4.2 Construcción del destilador final

Para el sistema de almacenamiento de agua se utilizó un recipiente de acero inoxidable de (40x10x10) cm respectivamente, al cual se le colocó otro recipiente con separación de ½in en ambos, se administró espuma de poliuretano para aislar una caja de otra y así evitar las pérdidas de calor. También se le adicionó un niple de ½in macho en la parte baja de la caja como entrada de agua y otro en la parte superior como salida de agua. Se colocó en la salida un tubo de cobre de 3/8in al cual se le hizo un serpentín como condensador y se mantuvo unido a la salida de agua con una tuerca cónica de latón. Ya en la parte final se colocó una manguera transparente de 3/8in sujeta con una abrazadera, la cual va directa al tanque de almacenamiento de agua tratada. En lo que respecta al tanque de llenado, se utilizó una válvula *check* para evitar el regreso del agua y no calentar ese tanque y así evitar pérdidas de calor en ese componente. Finalmente, se colocó el sistema

² El efecto invernadero es un proceso en el que la radiación térmica emitida por la superficie planetaria es absorbida por los gases de efecto invernadero (GEI) atmosféricos y es reirradiada en todas las direcciones.

de almacenamiento de agua en un soporte con el objetivo de dar una inclinación de 21° a los tubos al vacío, como se observa en la Figura 33.



Figura 33. Proceso de construcción del destilador solar.

2.4 Análisis financiero de los dispositivos

Para el análisis financiero, se determinó los costos de construcción de ambos dispositivos. El costo total de los dispositivos (C_t) incluyó la mano de obra (C_o) requerida en cada dispositivo, el C_{bomb} y los gastos de mantenimiento (C_m). El costo de construcción de los dispositivos se calculó con la Ecuación 17.

$$C_t = C_m + C_{bomb} + C_o \quad (17)$$

El costo de C_m se determinó con el número de personas necesarias para su construcción, brindándoles como pago un salario mínimo (\$73.04) de acuerdo al año 2016. Para el costo del mantenimiento se consideró el material necesario, considerando que se tiene un manejo adecuado de los dispositivos se planteó que fuera una vez al año en OI y, 12 veces al año en DS.

Por otra parte, fue importante determinar el costo que presentó el kilogramo por metro cuadrado de agua tratada (C_a) y para ello se utilizó la Ecuación 18 donde se considera la suma de C_o y el costo de la energía eléctrica o consumo energético C_e . Este resultado se multiplicó por la vida útil (V_u) del dispositivo y se dividió entre el producto de la producción (P) y V_u . Al resultado se sumó el factor M y se restó el excedente de producción que se tuvo (E).

$$C_a = \frac{C_t + ((C_e + C_o)V_u)}{(P)(V_u)} + M - E \quad (18)$$

2.5 Análisis estadístico

Utilizando el software estadístico R, se realizó un análisis de comparación de medias en los resultados de los tratamientos de OI y DS.

2.6 Análisis del ciclo de vida ACV

Se utilizó el software SolidWorks para la realización del análisis de ciclo de vida delimitando el estudio en los parámetros siguientes:

Acidificación atmosférica. Son las emisiones ácidas, como el dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno los cuales incrementan la acidez del agua de lluvia que, a su vez, acidifica suelos y lagos (Solidworks, 2016).

Huella de carbono. Es la cantidad de emisiones de CO₂ que se realizan desde la obtención de materias primas hasta el tratamiento de desperdicios (Jiménez, 2007).

Energía consumida. Incluye los combustibles utilizados durante el ciclo de vida y la energía necesaria para obtener y procesar dichos combustibles, así como la energía incorporada en los materiales y consumida en la combustión (Solidworks, 2016).

Eutrofización del agua. Fenómeno que experimentan algunos sistemas acuáticos debido al exceso de nutrientes como fósforo y nitrógeno que se acarrean desde la cuenca del drenaje y se manifiesta con la proliferación y acumulación excesiva de plantas superiores y algas (Mazzeo *et al.*, 2002).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Requerimientos de la ósmosis inversa (OI)

3.1.1 Necesidades energéticas

Al aplicar la Ecuación 2, se obtuvo $P_{arreglo}$ de 25.71 w considerando 8 H_{op} y 205.7 w de E_{media} , resultante de la suma de potencias de las dos bombas a utilizar. Después se prosiguió a calcular la $P_{paneles}$ utilizando los dos paneles fotovoltaicos de 250 w del cual se obtuvo un valor de 498.65 w y a partir de estos parámetros se pudo sustituir valores en la Ecuación 3 para obtener el $N_{paneles}$ que se necesitan para construir el arreglo fotovoltaico. El cálculo muestra como requerimiento el uso de 1.05 paneles solares considerando una producción eléctrica con eficiencia del 100%.

De manera práctica se llegó a la conclusión de que se debe operar el dispositivo de OI con dos paneles fotovoltaicos, ya que no se cuenta con un seguidor solar instalado en ellos; adicionalmente, existen días nublados lo que dificulta el obtener una eficiencia del 100% en ellos. Sin embargo, en la cuestión teórica se consideraron parámetros óptimos lo que fundamenta la posibilidad de operación de los dispositivos con un panel.

3.1.2 Comportamiento osmótico y de flujo

Para conocer el flujo que presenta la membrana semipermeable con ciertas características de operación es necesario primeramente conocer las características que el fabricante brinda en su ficha técnica. Para nuestro caso, las características de membranas adquiridas para el dispositivo de OI se muestran en la Tabla 9.

Se aplicó la Ecuación 5 para obtener la P_{osm} que tuvieron las aguas seleccionadas para tratamiento, después el valor obtenido se sustituyó en la Ecuación 7 para obtener el rendimiento o F que presenta la membrana con cada muestra de agua, considerando una P_{sis} de 100 psi. Los valores obtenidos de cada muestra se observan en la Tabla 10.

Tabla 9. Ficha técnica de la membrana semipermeable.

<i>Modelo</i>	TW30-1812-24
<i>Presión a aplicar</i>	50 psi
<i>Flujo de permeado</i>	3.8 L/h
<i>Sales de rechazo</i>	98%
<i>Tipo de membrana</i>	compuesta de una pequeña capa de poliamida
<i>Temperatura máxima de operación</i>	45°C
<i>Presión máxima de operación</i>	150 psi
<i>Velocidad máxima de flujo de alimentación</i>	7.6 L/min
<i>Rango de pH</i>	2 a 11
<i>Tolerancia al cloro permeabilidad</i>	0.1 ppm 4.2 L/m ² h psi

Tabla 10. Flujo de la membrana y presión necesaria para el permeado de cada punto de muestreo.

<i>Sitio</i>	<i>Moles totales</i>	<i>P_{osm}</i>	<i>Flujo de la membrana (m³/s)</i>
<i>Sahuayo</i>	0.03285	11.64837	0.001031
<i>San Gregorio</i>	0.0385	13.65182	0.001007
<i>Los Negritos</i>	0.0406	14.39646	0.000999
<i>San Gregorio</i>	0.0182	6.453585	0.001091
<i>San Gregorio</i>	0.0382	13.54544	0.001009
<i>Jiquilpan</i>	0.0387	13.72273	0.001007
<i>Cotijarán</i>	0.0154	5.460726	0.001103
<i>Ojo de agua</i>	0.0348	12.33982	0.001023
<i>La Palma</i>	0	0	0
<i>La Palma</i>	0.0726	25.74342	0.000866
<i>La Palma</i>	0	0	0
<i>El salitre</i>	0.0084	2.978578	0.001132
<i>El salitre</i>	0.00746	2.645261	0.001136
<i>Cotijarán</i>	0.0156	5.531645	0.001102
<i>Pajacuarán</i>	0.0446	15.81483	0.000982

A través de estos cálculos se pudo obtener de manera teórica el comportamiento de la membrana semipermeable. Los resultados de estos cálculos se compararon con los datos obtenidos empíricamente de rendimiento de OI (0.14 L/min) y se obtuvo la η_{OI} mediante la Ecuación 6. Las diferentes eficiencias se muestran en la Tabla 11 de las cuales se obtuvo la media del 45% en el dispositivo de OI construido.

Tabla 11. Eficiencia de la membrana semipermeable.

<i>Sitio</i>	<i>Eficiencias (%)</i>
<i>Sahuayo</i>	51.5384527
<i>San Gregorio</i>	50.3697746
<i>Los Negritos</i>	49.9353986
<i>San Gregorio</i>	54.5687419
<i>San Gregorio</i>	50.4318283
<i>Jiquilpan</i>	50.3284054
<i>Cotijarán</i>	55.1479098
<i>Ojo de agua</i>	51.1351036
<i>La Palma</i>	0
<i>La Palma</i>	43.3163368
<i>La Palma</i>	0
<i>El salitre</i>	56.5958296
<i>El salitre</i>	56.7902645
<i>Cotijarán</i>	55.1065407
<i>Pajacuaran</i>	49.1080159
<i>MEDIA</i>	44.9581735

3.2 Requerimientos del destilador solar (DS)

3.2.1 Necesidades energéticas

Para las mediciones energéticas del DS, se siguió el mismo procedimiento que en la OI obteniendo prácticamente los mismos valores, pero con las variantes de la E_{media} la cual en este caso resultó de 186.5 w, $P_{arreglo}$ de 23.31 w y un $N_{paneles}$ 1.04.

De igual forma, se concluyó que se requieren dos paneles solares para la operación del equipo de bombeo que necesita el DS.

3.2.2 Comportamiento térmico

Al igualar la Ecuación 9 y 10 y despejar T_2 se pudo obtener el comportamiento térmico del DS. Se tomaron como valores constantes la temperatura inicial $T_1 = 25$ °C, el área $A = 5220 \text{ cm}^2$, la masa de $m = 12.5 \text{ L}$ considerando un llenado de 2.5 L por cada tubo y para el calor específico C_p se tomó el valor del agua ($1 \frac{\text{Cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}$). Por último, los valores de radiación incidente I_c en el área de estudio con coordenadas 20.014710, -102.743687 fueron tomados de Paul W y Stackhouse, Jr. (2016), en donde se toma un satélite de la NASA para obtener la media mensual de radiación solar incidente. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 12. Se graficó utilizando los datos de la T_2 alcanzada cada cinco minutos, de lo cual en la Figura 34 se observó un comportamiento térmico lineal.

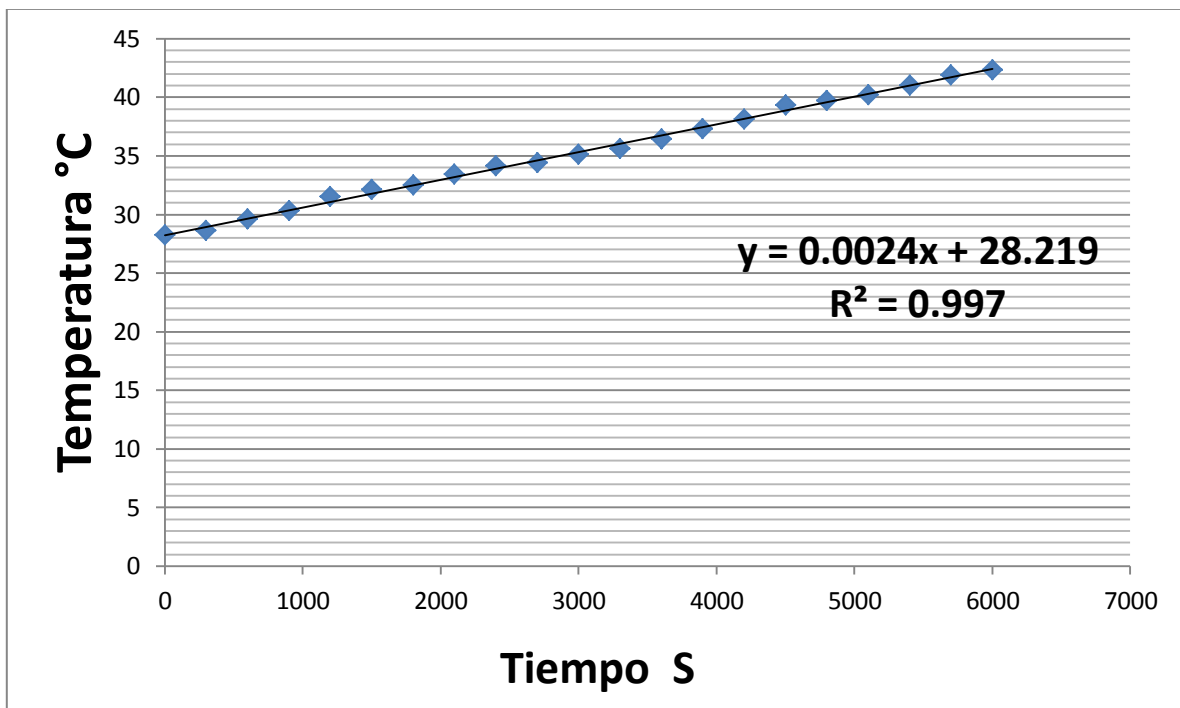


Figura 34. Comportamiento térmico.

Tabla 12. Radiación solar en la Ciénega de Chapala, Michoacán.

Mes	Radiación kwh/m ² /d	Horas luz	Radiación neta (w/m ² /d)
Enero	4.87	11	442.73
Febrero	5.86	11.5	509.57
Marzo	6.87	12	572.50
Abril	7.23	12.6	573.81
Mayo	7.07	13	543.85
Junio	6.28	13.3	472.18
Julio	5.87	13.2	444.70
Agosto	5.78	12.8	451.56
Septiembre	5.35	12.2	438.52
Octubre	5.39	11.7	460.68
Noviembre	5.25	11.2	468.75
Diciembre	4.66	10.9	427.52
Media	5.87	12.12	484.73

3.2.3 Dimensionamiento del DS

Se aplicó la Ecuación 13 para determinar la m a través de la relación de las Ecuaciones 11 y 12 y así se conoció la producción teórica del DS. Se obtuvo una producción de $3.35 \frac{Kg}{m^2}$ con los parámetros considerados. De esta manera, si se pretendiera obtener otra producción solamente se necesitaría colocar el valor de radiación, tiempo o masa.

De manera empírica se alcanzó una media de producción diaria de $2.7 \frac{Kg}{m^2}$, por lo cual se aplicó la Ecuación 16 para conocer la eficiencia del DS (η_{DS}) logrando el 83% de ésta.

3.3 Análisis físico-químicos y químicos del agua para uso agrícola

Los resultados de las caracterizaciones físico-químicas y químicas de los 14 pozos profundos y el Lago de Los Negritos se muestran en la Tabla 14. Los datos muestran una gran variedad de C.E. en los sitios de muestreo, con extremos de 330 y 3,820 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La Ciénega de Chapala, Michoacán, es una cuenca

endorreica, lo que causa la acumulación diferencial de sales en los diferentes estratos geológicos que se relacionan con las fuentes de agua (pozos, lago). Además, la zona se encuentra bajo la influencia de procesos geotérmicos que contribuyen a incorporar una alta cantidad de sales en el perfil de los suelos (Velázquez y Pimentel, 2012). El rango de pH fue de 6.3 a 8.88, con el 93% de las muestras con valores alcalinos (pH > 7.4), aunque dentro del límite permisible que establece la NORMA Oficial Mexicana NOM-CCA/032-ECOL/1993 para uso agrícola (Tabla 13). Solamente el pozo de Jiquilpan (6)³ presentó una ligera acidez (6.3) y la mayor alcalinidad se observó en el lago Los Negritos (8.88).

Tabla 13. Límites permisibles del agua para uso agrícola.

<i>Parámetro</i>	<i>Unidades</i>	<i>Límite permisible</i>
<i>pH</i>		6.5 a 8.5
<i>CE</i>	µS/cm	2000
<i>B</i>	mg/L	1.5
<i>Cu</i>	mg/L	0.2
<i>Mn</i>	mg/L	0.2
<i>Pb</i>	mg/L	5
<i>Zn</i>	mg/L	2

NOM-CCA/032-ECOL/1993. No se detectó presencia importante de metales pesados, posiblemente por los elevados valores de pH de la mayoría de las muestras de agua. Una elevada alcalinidad causa la precipitación de estos metales en formas químicas de baja solubilidad (Chávez et al., 2010). Con respecto al B, de acuerdo con Ayers y Westcot (1989), 1-2 mg/L de este elemento en el agua de riego puede causar toxicidad a la mayoría de los cultivos. La NOM-CCA/032-ECOL/1993 establece un límite de 1.5 mg/L para uso agrícola. En el Lago de los Negritos, dentro del municipio de Villamar (sitio 3), se detectó un alto contenido de B (24.4 mg/L) y en los pozos de San Gregorio (sitio 5) y La Palma de Venustiano Carranza (sitio 10) se detectaron 2.2 y 4.2 mg/L, respectivamente.

³ Los números en paréntesis indican el número de muestra conforme a los datos presentados en la Tabla 7 y 8.

Tabla 14. Análisis físico-químicos y químicos iniciales de las aguas muestreadas.

Muestra	Sitio	pH	$\mu S/cm$	meq/L							RAS	Metales pesados (ppm)				(ppm)						
			CE	Ca	Mg	Na ⁺	K	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻		Cu	Mn	Zn	Fe	SDT	N	P	B	Dureza	SO ₄ ²⁻	N-NH ₄ ⁺
1	Sahuayo	8.03	1097	5.3	2.9	7	0	0.05	0.7	7.7	3.5	ND	ND	ND	ND	533	0.5	1.5	0.6	130	2	0.5
2	San Gregorio	7.53	1571	3.2	4	6	0	1.6	0.6	14.8	3.3	ND	1.552	ND	0.46	791	4.7	5.1	0.6	385	0.7	4.7
3	Los Negritos	8.88	3820	4.2	2.4	1	2	18.3	1.2	4.1	0.6	ND	ND	ND	ND	1900	0.2	3.7	24.4	100	13.6	0.2
4	San Gregorio	7.47	337	4.2	2.8	1	0	0.5	0	2.6	0.4	ND	0.181	ND	0.644	176	1.3	2.3	0.1	105	0.5	1.3
5	San Gregorio	7.4	1615	3.6	4.1	3	1	1.6	1.2	15.7	1.3	ND	0.906	ND	ND	823	2.9	2.5	2.2	380	0.3	2.9
6	Jiquilpan	6.3	646	11	4.4	0	0	0.3	0.7	6.5	0.1	ND	ND	ND	ND	325	ND	0.1	ND	345	0.2	ND
7	Cotijarán	7.18	284.9	2.5	3	0	0	0.2	0.2	3.3	0.2	ND	ND	ND	ND	142.5	0.7	0.5	ND	100	0.1	0.7
8	Ojo de agua	7.32	687	9.1	4	0	0	0.4	0.5	6.6	0.1	ND	ND	ND	ND	345	0.6	0.5	0.2	215	1.4	0.6
9	La Palma	8.23	411	ND	3	0	0	0.2	0.6	4.1	0.1	ND	ND	ND	ND	207	0.1	0.4	0.6	10	0.1	0.1
10	La Palma	8.34	3170	4.6	5.1	4	1	5.2	2.7	37.6	1.9	ND	ND	ND	ND	1600	4	9.2	4.2	275	5.3	4
11	La Palma	8.52	379	ND	1.1	1	0	0.3	1.3	3.9	0.9	ND	ND	ND	ND	194	0.1	0.3	0.5	10	0.04	0.1
12	El salitre	8.1	356	0.2	1	0	1	0.3	0.6	3.6	0.3	ND	ND	ND	ND	181	ND	0.4	ND	60	0.1	ND
13	El salitre	8.34	2937	0	1	0	1	0.2	0.7	3.1	0.3	ND	ND	ND	ND	148.6	ND	0.6	ND	65	0.06	ND
14	Cotijarán	8.1	330	4	1.2	0	0	0.2	0.7	3.3	0.1	ND	ND	ND	ND	166	0.6	0.8	ND	110	5.6	0.6
15	Pajacuarán	7.25	1714	3.3	4.4	3	1	3.6	0	22	1.6	ND	ND	ND	ND	861	5.7	1.5	0.2	630	9.8	5.7

En los sitios restantes de muestreo los niveles de este elemento permanecieron por debajo de 1 mg/L. Es de resaltar que bajas concentraciones de este elemento (<1.0 mg/L) son benéficas para el desarrollo de las plantas (Brady y Weil, 2002). El nivel de RAS de las muestras según el diagrama de Richards que presenta Ayers y Westcot (1989) se encuentra en un nivel bajo, con C.E. de media hasta muy alta. Figura 35.

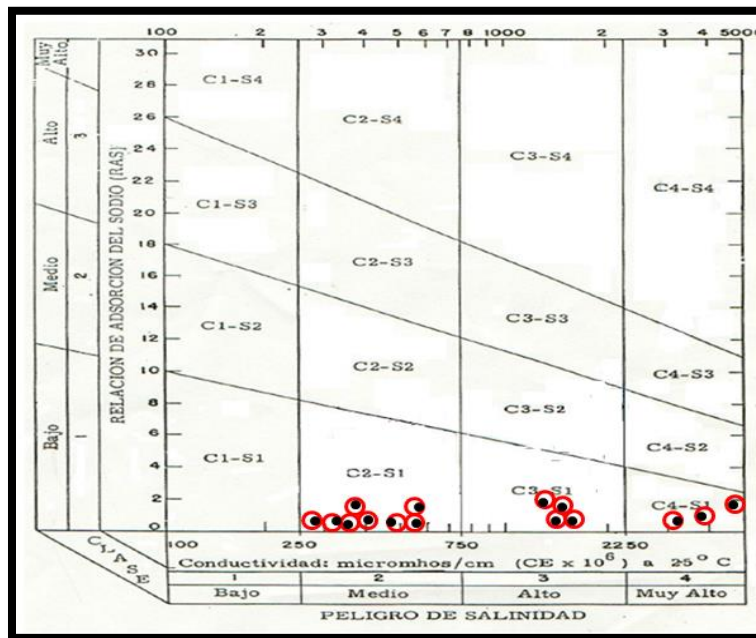


Figura 35. Clases de agua obtenidas de acuerdo al Diagrama de Richards.

3.4 Parámetros de calidad del agua para uso y consumo humano

La NORMA Oficial Mexicana que establece los parámetros que indican si el agua es apta para uso y consumo humano es la NOM-127-SSA1-1994. En la Tabla 15 se presentan los límites máximos permitidos de estos parámetros. En relación con los resultados de los análisis físico-químicos y químicos realizados a las muestras de agua, que se aprecian en la Tabla 14, se puede observar que la mayoría de las muestras presentan buena calidad para para uso y consumo humano, solamente

las muestras (1), (2), (4), (5), (7), (8), (10) y (14), contienen alto contenido de $N-NH_4^+$ y las muestras (3), (5) y (10) exceden el límite de Boro.

Tabla 15. Límites permisibles del agua para uso y consumo humano.

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Límite permisible</i>
<i>pH</i>	-----	6.5-8.5
<i>Sólidos totales disueltos</i>	mg/L	1000
<i>Cl</i>	mg/L	250
<i>Na⁺</i>	mg/L	200
<i>SO₄²⁻</i>	mg/L	400
<i>Cd</i>	mg/L	0.005
<i>Fe</i>	mg/L	0.3
<i>Mn</i>	mg/L	0.15
<i>Pb</i>	mg/L	0.01
<i>Cu</i>	mg/L	2
<i>Zn</i>	mg/L	5
<i>As</i>	mg/L	0.05
<i>B</i>	mg/L	1
<i>N-NH₄</i>	mg/L	0.5

NOM-127-SSA1-1994.

3.5 Análisis físico-químicos y químicos de las aguas tratadas

Para las pruebas de funcionamiento se seleccionaron cinco muestras de las aguas; se buscó que las muestras seleccionadas estuvieran dentro del rango de lo que Ayers y Westcot (1989) llaman peligrosidad de las aguas de muy altas a bajas mediante el diagrama de Richards. Las muestras seleccionadas se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Fuentes de agua seleccionadas para someterlas a tratamientos de desalinización.

<i>Muestra</i>	<i>Sitio</i>
2	San Gregorio A
3	Los Negritos
4	San Gregorio B
5	San Gregorio C
10	La Palma

3.6 Resultados con el proceso de ósmosis inversa

En la Tabla 17 se muestran los cinco puntos seleccionados y los resultados de los análisis físico-químicos y químicos que se realizaron a las aguas no tratadas (N T) y tratadas con el proceso de OI (T OI). Por otra parte con los datos de la Tabla 18, se determinó el porcentaje de reducción que presentó el tratamiento en cada parámetro. Con respecto a la C.E., se observa una disminución media de 76.9% con un máximo de desalinización de 97.9%, valores por debajo del rango de 99% que Melorose *et al.* (2015) y Ortega (2001) obtuvieron en su investigación. Una de las diferencias es que estos autores utilizaron en sus procesos membranas de tipo industrial y en esta investigación se utilizó una membrana de baja producción. En los SDT se obtuvo una reducción media del 80.2% alcanzando el 96.6% máximo, por debajo de Melorose *et al.* (2015), quienes en su investigación lograron remover el 99% de SDT. Ambos parámetros, C.E. y SDT, se encuentran por debajo del límite permisible de las normas para aguas de uso agrícola y consumo humano, NOM-CCA/032-ECOL/1993 y NOM-127-SSA1-1994 respectivamente. En cuanto al nivel de pH, con el proceso de OI se presentó una reducción muy variable, en el caso del punto 4, se redujo de 8.88 a 3.5; mientras que en el punto 2 fue de 8.03 a 6.5 esto se deriva de la eliminación de los iones alcalinos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), los cuales a su vez Vourch *et al.* (2008) lograron remover al 99% en su investigación.

Por su parte, el B en las aguas no tratadas arrojó un valor medio de 6.35 mg/L; después de llevar a cabo el tratamiento, resultaron aguas con rangos de concentración de 33.4 a 2.1 mg/L encontrándose fuera de los límites permisibles de ambas normas. Observando los niveles de B resultantes del tratamiento, se determinó que el dispositivo de OI no fue capaz de remover este elemento. Los valores que se alcanzaron de B oscilan dentro de los mismos resultados obtenidos por Velázquez *et al.* (2011), quienes determinaron concentraciones de este elemento en pozos profundos y aguas superficiales de la Ciénega de Chapala y encontraron valores desde 0.2 a 12 mg/L, aumentando la presencia de éste conforme más se acercaban al lago de los negritos.

En Dureza, se obtuvo una eficiencia del 100% ya que el Ca^{2+} y el CO_3^{2-} fueron reducidos a cero. Se aplicó la Ecuación 1 para obtener la relación de adsorción de sodio. Los valores fueron de baja a muy alta RAS, esto debido a que los niveles de Mg^{2+} y Ca^{2+} fueron reducidos a valores cercanos a cero y el Na^+ se mantuvo arriba de 1 mg/L .

En cuanto a Cl^- , se obtuvo un resultado medio del 94.9% en la eficiencia de remoción de este ion, con valores por debajo de los 250 mg/L que establecen las NOM-127-SSA1-1994 y NOM-041-SSA1-1993. Vourch *et al.*, (2008) lograron remover el ion Cl^- de las aguas de desecho en un 98.2%, valor muy cercano al alcanzado en esta investigación. En la remoción de CO_3^{2-} , se obtuvo una eficiencia del 100% muy por arriba de los resultados obtenidos por Vera *et al.* (2009) donde a pesar de tener dos pasos en su proceso, no pudieron remover este ion por completo.

La media de reducción de SO_4^{2-} fue del 67.6%, alcanzando un máximo de 98.6%. En cuanto a la remoción de N-NH_4^+ , este proceso no presentó eficiencia. La NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-041-SSA1-1993, BIENES Y SERVICIOS. AGUA PURIFICADA ENVASADA. ESPECIFICACIONES SANITARIAS, establece un límite de 0.5 mg/L de N-NH_4^+ y 250 mg/L de SO_4^{2-} , y todas las muestras analizadas presentan valores por debajo del límite. Se puede observar que la mayoría de las muestras presentan buena calidad en relación con la concentración de N-NH_4^+ , con excepción de la muestra (3), En cuanto a SO_4^{2-} , todas las muestras están muy por debajo del límite marcado por las normas mexicanas mencionadas.

Tabla 17. Resultado de las aguas tratadas mediante ósmosis inversa.

Muestra	Unidades	2		3		4		5		10	
		San Gregorio 1	Los Negritos	San Gregorio 2	San Gregorio 3	La Palma					
<i>Parámetro</i>		NT	T OI	NT	T OI	NT	T OI	NT	T OI	NT	T OI
<i>pH</i>		8.03	6.5	7.53	3.14	8.88	3.5	7.4	3.93	8.34	3.9
<i>CE</i>	μS/cm	1097	783.33	1571	243.53	3820	80.53	1615	54.4	3170	142.5
<i>Ca²⁺</i>	meq/L	5.3	0	3.2	0	4.2	0	3.6	0	4.6	0
<i>Mg²⁺</i>	meq/L	2.9	0.06	4	0.27	2.4	0.003	4.1	0.01	5.1	0.01
<i>Na⁺</i>	meq/L	7	1.2	6	2.7	1	1.03	3	1.9	4	0.73
<i>K⁺</i>	meq/L	0.3	0.66	1.5	0.26	0.3	0	0.5	0	1	0
<i>Cl⁻</i>	meq/L	0.05	0.66	1.6	3.4	18.3	0.03	1.6	0.16	5.2	0.76
<i>CO₃²⁻</i>	meq/L	0.7	0	0.6	0	1.2	0	1.2	0	2.7	0
<i>HCO₃⁻</i>	meq/L	7.7	1.03	14.8	0	4.1	0.03	15.7	0.1	37.6	0.1
<i>RAS</i>		3.5	6.93	3.3	7.35	0.6	26.59	1.3	26.87	1.9	10.32
<i>Dureza</i>	mg/L	385	0	100	0	105	0	380	0	275	0
<i>SDT</i>	mg/L	791	366.66	1900	121.96	176	40.53	823	28.16	1600	70.23
<i>N-NH₄⁺</i>	mg/L	4.7	0	0.2	1.33	1.3	10.9	2.9	0.06	4	0.33
<i>SO₄²⁻</i>	mg/L	0.7	0.43	13.6	0.43	0.5	0.2	0.3	0.1	5.3	0.2
<i>B</i>	mg/L	0.6	33.43	24.4	33.2	0.2	2.07	2.2	2.16	4.2	4.16
<i>P</i>		5.1	7.63	3.7	1.7	2.3	0.83	2.5	0.66	9.2	0

Tabla 18. Porcentaje de reducción de los valores de los parámetros de calidad del agua con el tratamiento de ósmosis inversa.

	2	3	4	5	10	Media
<i>pH</i>	---	---	----	----	----	----
<i>CE</i>	28.6	84.5	97.9	96.6	95.5	76.9
<i>Ca²⁺</i>	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
<i>Mg²⁺</i>	97.9	93.3	99.9	99.8	99.8	97.7
<i>Na⁺</i>	82.9	55.0	----	36.7	81.8	58.2
<i>K⁺</i>	100.00	100.00	100.0	100.0	100.0	100.0
<i>Cl⁻</i>	----	----	99.8	90.0	85.4	94.9
<i>CO₃²⁻</i>	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
<i>HCO₃⁻</i>	86.6	100.0	99.3	99.4	99.7	96.3
<i>RAS</i>	----	----	----	----	----	----
<i>Dureza</i>	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
<i>SDT</i>	53.6	93.6	77.0	96.6	95.6	80.2
<i>N-NH₄⁺</i>	100.0	----	----	98	91.75	58
<i>SO₄²⁻</i>	38.6	96.8	60.0	75.0	96.2	67.6
<i>B</i>	---	----	----	1.8	1.0	1.8
<i>P</i>	---	54.1	63.9	73.6	100.0	63.9
<i>Media</i>						71.4

Como se aprecia en las Tablas 17 y 18, el tratamiento de ósmosis inversa (OI) fue más eficiente en la reducción de pH, CE, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, dureza y SDT, mientras que para el Na⁺ y Cl⁻ fue menor. Esta menor eficiencia en la remoción de Na⁺ causa que se incremente el valor del RAS, aspecto que se considera negativo en caso de usar estas aguas tratadas en el riego de cultivos. El método de ósmosis inversa fue poco eficiente para la remoción de N-NH₄⁺ y B, cuyos valores incluso se incrementaron de manera general con el tratamiento de OI.

3.7 Resultados con el proceso de destilación solar

En la Tabla 19 se muestran los resultados de los análisis físico-químicos y químicos sin tratamiento (NT) comparados con aquellos obtenidos con el tratamiento de destilación solar (T DS). Por otra parte, en la Tabla 20 se determinó el porcentaje de reducción que presentó la DS en cada parámetro analizado. Con respecto a la CE y SDT, se obtuvieron valores dentro de las NOM-CCA/032-

ECOL/1993 y NOM-127-SSA1-1994. El tratamiento con DS causó una reducción general de 79.4% en los valores de los parámetros de calidad del agua, con extremos de 0% y 100% para el N-NH_4^+ y K^+ , respectivamente. Para la CE y SDT se obtuvieron reducciones de 95.02 y 90.8%, acercándose a la eficiencia del 99.9% en los resultados de CE y SDT que obtuvieron Dev *et al.* (2011) al desalinizar con DS agua de mar.

La DS presentó una reducción del pH de todas las muestras con un valor medio de 20.29% dejándolas en rangos de entre 6 y 5, los cuales se encuentran debajo del límite establecido por las normas de uso agrícola y de uso y consumo humano. Sklavos *et al.* (2015) obtuvieron valores semejantes de pH con rangos de 5.07 a 3.91; por otra parte, Armendáriz *et al.* (2003) obtuvieron un valor medio de pH de 7.2 con un destilador solar. Esta diferencia de pH que se ha obtenido con distintos modelos de destiladores solares se relaciona con el tipo de agua a tratar y la eficiencia del destilador.

En el parámetro de dureza se obtuvo una eficiencia del 100%, esto debido a la remoción que se tuvo del 100% en CO_3^{2-} y Ca^{2+} . Este resultado fue mayor al obtenido por Carballo (2011) quien no pudo disminuir el valor de la dureza en su totalidad, pero llegó a mantener un nivel medio de este parámetro de 15.5 mg/L al igual que Flores (2015), el cual obtuvo un valor medio de 17.8 mg/L.

De la Cruz (2013), elaboró un destilador solar portátil con el cual sometió a tratamiento agua con concentraciones altas de iones; después del tratamiento, obtuvo valores de 0.9 para Cl^- , 2.4 de HCO_3^- y 0.24 meq/L de Mg^{2+} , concentraciones mayores a las obtenidas en esta investigación (0.07, 0.94 y 0.006 meq/L de Cl^- , HCO_3^- y Mg^{2+} , respectivamente). La norma para uso y consumo humano establece un límite de Cl^- de 250 mg/L (7.05 meq/L). Así, en el presente trabajo se obtuvo un agua prácticamente libre de este ion.

La reducción media del SO_4^{2-} con el método de DS fue del 72%, con extremos de 40% (sitio San Gregorio) a 98% (sitio Los Negritos). La NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-041-SSA1-1993, BIENES Y SERVICIOS. AGUA PURIFICADA

ENVASADA. ESPECIFICACIONES SANITARIAS establece un límite de 250 mg/L (5.2 meq/L) de SO_4^{2-} , en tanto que todas las muestras tratadas con DS en este trabajo están por debajo del límite.

En el caso del N-NH_4^+ , solamente en una de las aguas tratadas se observó una disminución de la concentración con el tratamiento de DS; en las restantes cuatro muestras la concentración aumentó de 3 (sitio La Palma) hasta 69 veces (sitio Los Negritos). En relación al B, el tratamiento de DS disminuyó la concentración de este elemento en 91.6% como media, con extremos de 58 (sitio San Gregorio) a 100% (Los Negritos, La Palma). Las concentraciones de B obtenidas después el tratamiento se encuentran dentro de los límites establecidos por las normas NOM-CCA/032-ECOL/1993, NOM-127-SSA1-1994 y lo que Ayers y Westcot (1989) determinan como agua de buena calidad para uso agrícola. Resultados similares se observaron para las concentraciones de P, donde la disminución de estos valores después del tratamiento de DS fue de 98 al 100%.

En cuanto a los valores de RAS que se obtuvieron, en dos de las muestras de agua tratadas se observó un incremento de 3 a 33 veces (sitios San Gregorio 1 y San Gregorio 2), mientras que en las restantes muestras de agua el valor de RAS disminuyó. El incremento del RAS se debe a que el tratamiento de DS reduce hasta el 100% de los iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} , mientras que el Na^+ disminuyó solamente del 45 al 81%, causando un incremento en la relación $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$. Para observar el nivel de RAS de las muestras, se elaboró el diagrama de Richards. En la Figura 36 se aprecian seis de las muestras que pudieron ser graficadas, mientras que las restantes presentaron valores cercanos a cero y no pudieron mostrarse en este diagrama. Los puntos azules pertenecen a las muestras tratadas con ósmosis inversa (OI) y los verdes a las tratadas con destilación solar (DS). Con el tratamiento de OI se obtuvieron mayores valores de RAS y menores de CE, mientras que en el tratamiento de DS ocurrió el caso inverso.

Tabla 19. Resultado de las aguas tratadas mediante destilación solar (DS).

Sitio	Parámetro	2		3		4		5		10		
		San Gregorio 1		Los Negritos		San Gregorio 2		San Gregorio 3		La Palma		
	Unidad	NT	T DS	NT	T DS	NT	T DS	NT	T DS	NT	T DS	
	pH	8.03	6.4	7.53	6.73	8.88	5.81	7.4	6	8.34	6.4	
	CE	μS/cm	1097	134.26	1571	32.63	3820	108.26	1615	56.23	3170	134.6
	Ca ²⁺	meq/L	5.3	0	3.2	0	4.2	0	3.6	0	4.6	0
	Mg ²⁺	meq/L	2.9	0.02	4	0	2.4	0.01	4.1	0	5.1	0
	Na ⁺	meq/L	7	1.3	6	3.3	1	1.4	3	1.4	4	2.16
	K ⁺	meq/L	0.3	0	1.5	0	0.3	0	0.5	0	1	0
	Cl	meq/L	0.05	0.03	1.6	0.03	18.3	0.26	1.6	0	5.2	0.03
	CO ₃ ²⁻	meq/L	0.7	0	0.6	0	1.2	0	1.2	0	2.7	0
	HCO ₃ ⁻	meq/L	7.7	0.2	14.8	1.1	4.1	1.23	15.7	1.1	37.6	1.1
	SO ₄ ²⁻	mg/L	0.7	0.26	13.6	0.23	0.5	0.2	0.3	0.1	5.3	0.26
	RAS		3.5	13	3.3	0	0.6	19.8	1.3	0	1.9	0
	Dureza	mg/L	385	0	100	0	105	0	380	0	275	0.38
	SDT	mg/L	791	23.63	1900	24.4	176	54.43	823	54.56	1600	67.06
	N-NH ₄ ⁺	mg/L	4.7	0.5	0.2	13.9	1.3	10.9	2.9	15.6	4	14.36
	B	mg/L	0.6	0.25	24.4	0	0.2	0	2.2	0	4.2	0
	P	mg/L	5.1	0.2	3.7	0.1	2.3	0	2.5	0	9.2	0

Tabla 20. Porcentaje de reducción del DS.

	2	3	4	5	10	Media
<i>pH</i>	20.30	10.62	34.57	18.92	23.26	21.54
<i>CE</i>	87.76	97.92	97.17	96.52	95.75	95.02
Ca^{2+}	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Mg^{2+}	99.31	100.00	99.58	100.00	100.00	99.78
Na^+	81.43	45.00	----	53.33	46.00	56.44
K^+	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<i>Cl</i>	40.00	98.13	98.58	100.00	99.42	87.23
CO_3^{2-}	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HCO_3^-	97.40	92.57	70.00	92.99	97.07	90.01
SO_4^{2-}	62.86	98.31	40	66.66	95.1	72.58
<i>RAS</i>	----	100.00	----	100.00	100.00	60.00
<i>Dureza</i>	100.00	100.00	100.00	100.00	99.86	99.97
<i>SDT</i>	97.01	98.72	69.07	93.37	95.81	90.80
$N-NH_4^+$	----	----	----	----	-----	----
<i>B</i>	58.33	100.00	100.00	100.00	100.00	91.67
<i>P</i>	96.08	97.30	100.00	100.00	100.00	98.68

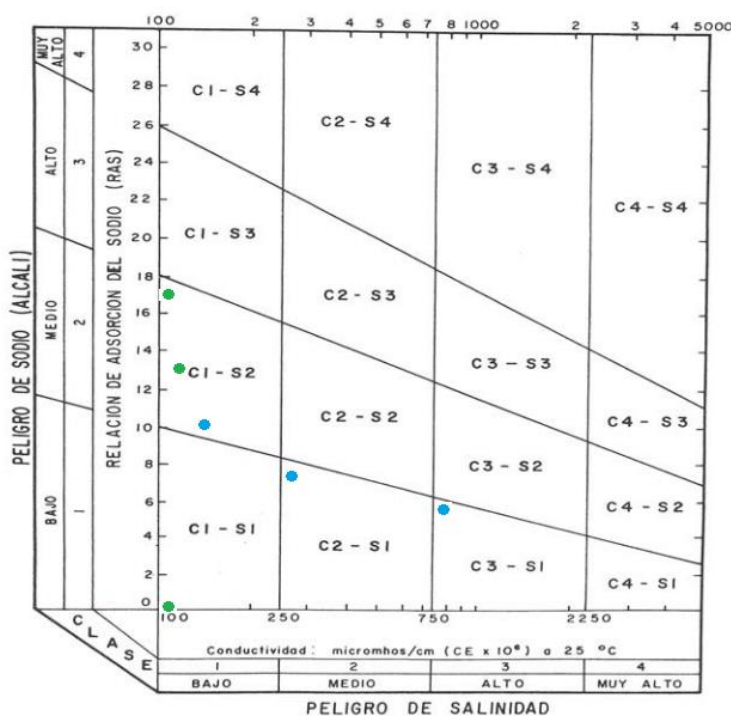


Figura 36. Clases de aguas resultantes con el tratamiento de ósmosis inversa (OI) y destilación solar (DS), de acuerdo al diagrama de Richards.

3.6 Análisis estadístico

Los resultados que se obtuvieron en el análisis estadístico de comparación de medias a través del software R, indican que en la mayoría de los parámetros de ambos procesos no existe diferencia significativa, a excepción del pH y contenido de bicarbonatos, donde el mejor método fue el de OI. Tabla 21.

Tabla 21. Comparación de medias del destilador solar y ósmosis inversa.

	<i>OI</i>	<i>DS</i>	<i>P-Value</i>
<i>pH</i>	3.9a	6.4b	0.02
<i>CE</i>	142.5a	108.26a	0.28
Ca^{2+}	0	0	0
Mg^{2+}	0.1a	0a	0.27
Na^+	1.2a	1.4a	0.46
K^+	0	0	0
<i>Cl</i>	0.66a	0.03a	0.2
HCO_3^-	0.1a	1.1b	0.03
CO_3^{2-}	0	0	0
SO_4^{2-}	0.2a	0.23a	0.43
<i>RAS</i>	10.32a	0a	0.18
<i>Dureza</i>	0.26a	0a	0.11
<i>STD</i>	70.23a	54.43a	0.26
$N-NH_4^+$	0.33a	13.9a	0.16
<i>B</i>	4.16a	0a	0.11

3.7 Análisis financiero

3.7.1 Análisis financiero del sistema de bombeo

Para conocer el costo de construcción que presentó el sistema de bombeo C_{bomb} primeramente fue necesario realizar un listado de los materiales que se necesitaron, los cuales se muestran en la Tabla 22.

3.7.2 Análisis financiero de ósmosis inversa

Para conocer el C_t del dispositivo de OI es necesario determinar el C_o y C_m que se requirió durante su construcción. Para el C_o se multiplicaron los cuatro días que se necesitaron por el salario mínimo antes establecido, resultando un valor de

$C_o = \$292.16$. El C_m se muestra en la Tabla 23, donde se enumeran los elementos requeridos para la construcción.

Tabla 22. Listado de materiales y costos del equipo de bombeo.

<i>Cantidad</i>	Descripción	Costo unitario	Precio total
2	Paneles fotovoltaicos de 250 W	\$4,800	\$9,600.00
1	inversor de (12-110)v	\$1,200.00	\$1,200.00
1	Tempo control de (36-12)v	\$1,300.00	\$1,300.00
1	Batería 19 celdas	\$2,400.00	\$2,400.00
1	Bomba de 1/4 HP	\$500.00	\$500.00
	Total:		\$15,000.00

Entonces $C_{bomb} = \$15,000.00$

En la Tabla 24, se muestra el mantenimiento (M) que necesita el dispositivo de OI durante el lapso de un año y el costo que presenta este.

Por lo cual aplicando la Ecuación 17 se pudo determinar el C_t de la OI el cual resultó de \$16,314.00

Ya por último, para saber el costo que tendrá el agua tratada se utilizó la Ecuación 16 el cual requiere conocer el consumo energético (C_e), la producción (P) que presentó y la vida útil (V_u). Para determinar el C_e que necesita la OI se revisó los precios se tiene por 1 kwh. CFE (2016), establece un precio de \$1.3 kwh en una casa promedio que tenga un consumo bimestral de 450 kwh. Si la OI se mantiene encendida durante ocho horas diarias tendríamos un C_e de \$2.13 por día.

Entonces el M de la OI es de \$1,200.00

La V_u de la OI fue considerada de 10 años como la que presenta Ashby (2009) de un auto, ya que un auto cuenta con filtros, empaques y plástico muy semejantes a los del sistema de ósmosis inversa, además de encontrarse dentro del rango de vida útil de la mayoría de dispositivos u objetos.

Tabla 23. Lista de materiales y costos de la ósmosis inversa.

<i>Cantidad</i>	<i>Nombre/Material</i>	<i>Tamaño</i>	<i>Precio unitario</i>	<i>Total</i>
2	Tramo de ángulo de acero	12m	\$120.00	\$240.00
1	Hoja de MDF	2 m ²	\$400.00	\$400.00
2	Cople de polipropileno	1/2 in	\$5.00	\$10.00
1	Llave de esfera de cobre	1/4 in	\$35.00	\$35.00
2	Reducción latón	(1/2 x 1/4) in	\$15.00	\$30.00
2	Niple polipropileno	1/2 in	\$10.00	\$20.00
1	Pintura para fondo	500 ml	\$80.00	\$80.00
1	Pintura roja	500 ml	\$50.00	\$50.00
3	Varillas de soldadura de bronce fosforado	35 cm	\$3.00	\$9.00
1	Silicón en frío	300 ml	\$45.00	\$45.00
1	Ósmosis inversa polipropileno	casera	\$3,869.00	\$4488.00
1	Cople en "t" de latón	1/2 in	\$40.00	\$40.00
1	Bomba booster	120 psi	\$1,650.00	\$1,650.00
1	Manómetro aluminio	1/4 in	\$85.00	\$85.00
1	Niple de latón	1/2 in	\$15.00	\$15.00
1	Reducción bushin de latón	(1/2 x 1/4) in	\$20.00	\$20.00
			Total:	\$7,217.00

Tabla 24. Costos de mantenimiento de la ósmosis inversa.

<i>Material</i>	Necesidad al año	Precio unitario	Precio total
<i>Filtros de sedimentos</i>	2 1/2	\$100.00	\$250.00
<i>Filtro de carbón granular</i>	2	\$85.00	\$170.00
<i>Filtro de carbón bloque</i>	2	\$90.00	\$180.00
<i>Post filtro de coco</i>	1	\$156.00	\$156.00
<i>Membrana semipermeable</i>	2/3	\$400.00	\$266.00
		Total:	\$1,022.00

. El E de producción de \$3.04. Una vez contando con todos los datos que se necesitan para calcular la Ecuación 16 se puede saber el precio del litro por día de agua tratada, la cual fue de $C_a = \$ 2.89/L$ suponiendo que el equipo opera los 365 días del año.

3.7.2 Análisis financiero del destilador solar

Para conocer el C_t del dispositivo del DS es necesario determinar el C_o y C_m que se requirió durante su construcción. Para el C_o se multiplicaron los cuatro días que se necesitaron por el salario mínimo antes establecido, resultando un valor de $C_o = \$292.16$. El C_m se muestra en la Tabla 25, donde se colocaron los elementos requeridos para la construcción.

En la Tabla 26 se muestra el mantenimiento M que necesita el dispositivo de DS durante el lapso de un año y el costo que presenta.

Por lo cual aplicando la Ecuación 17 se pudo determinar el C_t del DS el cual resultó de \$16,314.00

Ya por último, para saber el costo que tendrá el agua tratada se utilizó la Ecuación 18, la cual requiere conocer el consumo energético (C_e), la producción (P) que presentó y la vida útil (V_u). Como el diseño del DS cuenta con prácticamente las mismas partes que un calentador solar, la V_u que se consideró es la propuesta por Beade y García (2016) de 20 años. La P fue de $2.7 \frac{kg}{m^2}$ al día y con un C_e del DS fue considerado de cero ya que el flujo de agua sin tratar es bajo. También es

importante considerar el excedente de producción energética, el cual fue de prácticamente de 498.65 w teniendo un ahorro de \$5.18 día. El costo del agua tratada fue de $C_a = 5.93/L$ suponiendo que el equipo opera los 365 días del año.

Tabla 25. Lista de materiales y costos del DS.

<i>Cantidad</i>	Descripción	Precio unitario	Precio total
2	1m ² de lámina de acero tipo 430 acabado espejo	\$600.00	\$1,200.00
2	Varillas de soldadura para acero inoxidable	\$15.00	\$30.00
2	Varillas de bronce fosforado	\$3.00	\$6.00
1	Lata de pintura plata en aerosol	\$55.00	\$55.00
2	Tubo de cobre 3/8 in flexible	\$50	\$100.00
2	Tramo de ángulo de acero 12mm	\$120.00	\$240.00
5	Tubos al vacío	\$300	\$1500
5	Empaques de tubos	\$5.00	\$25.00
1	Bote	\$3.00	\$3.00
		Total:	\$3159.00

Entonces el C_m del DS resultó de \$3,159.00

Tabla 26. Costos de mantenimiento del destilador solar.

<i>Material</i>	Necesidad al año	Precio unitario	Precio total
<i>Jabón líquido</i>	1	\$30.00	\$30.00
<i>Empaques</i>	10	\$5.00	\$50.00
		Total:	\$80.00

3.8 Análisis de ciclo de vida (ACV) de ambos dispositivos

En la Figura 37 se observa la huella de carbono que se obtuvo con el destilador solar y el dispositivo de ósmosis inversa, con un total de 3,000 kg de CO₂ para el primer dispositivo y 5,100 kg de CO₂ para el segundo. NatureFund (2016) presenta en su página web un calculador de emisiones de CO₂, donde indica, a modo de

comparación, que una casa con un consumo de 450 kw llega a emitir 6,616 kg de CO₂ cada bimestre. Observando estos resultados, la huella de carbono del destilador solar tiene un bajo impacto, ya que las emisiones son producto de los 20 años de vida útil que se calcula para este dispositivo; de igual manera, el dispositivo de ósmosis inversa genera relativamente bajo impacto tomando en cuenta sus 10 años de vida útil. Sin embargo, construirlos con mayores dimensiones podría ser de alto impacto, ya que se necesitaría una mayor cantidad de materiales y mayor cantidad de energía. El dispositivo de OI genera una huella de carbono casi dos veces a la del destilador solar.



Figura 37. Huella de carbono de los dispositivos.

En la Figura 38 se observa la energía consumida por los dispositivos de DS y OI. El DS consume 3,400 Mj mientras que la OI 7,200 Mj, siendo la relación DS:IO de 2.11. Si se compara el nivel de energía que tiene un purificador de agua comercial de 45 w, con ambos dispositivos tenemos un impacto a los 20 años de 2,628 Mj de energía consumida, indicando un consumo mayor en ambos dispositivos. Esto se debe a los materiales utilizados y a la zona donde se realizó el estudio, esto último debido a las diferencias en radiación solar. En este caso, los materiales son los que presentan el mayor gasto energético en el DS, mientras que en la OI es la utilización.



Figura 38. Energía total consumida de ambos dispositivos.

La Figura 39 muestra el total de la acidificación atmosférica que produjo el DS y la OI a lo largo de su ciclo de vida, medida en kg de dióxido de azufre. En este resultado, la OI presentó una mayor acidificación (34 kg de SO₂) que el DS (22 kg de SO₂) debido a la utilización del dispositivo a lo largo de su vida. Al igual que en los pasados parámetros, los materiales son los que generan el mayor impacto.



Figura 39. Acidificación atmosférica de ambos dispositivos.

En la Figura 40 se observa el resultado que se obtuvo en el cálculo del nivel de eutrofización del agua que ocurre con los dos dispositivos, medido como kg de PO₄³⁻. El DS presentó un nivel de eutrofización de 2.9 kg de PO₄³⁻, mientras que el

de OI fue de 2.2 kg de PO₄e. Nuevamente, se observa que son los materiales los que generan un mayor nivel de eutrofización del agua.



Figura 40. Eutrofización del agua de ambos dispositivos.

IV. CONCLUSIONES

El objetivo de construir y evaluar dos dispositivos que utilicen energía solar para desalinizar agua se cumplió. Los procesos utilizados de ósmosis inversa (OI) y destilación solar (DS) fueron seleccionados por su alta eficiencia en la remoción de iones disueltos en el agua, lo cual se confirmó en el presente trabajo en una producción a nivel laboratorio pero escalable a tamaños mayores.

En el dispositivo de OI, el sistema de bombeo, -construido a base de elementos fotovoltaicos con la finalidad de simular la extracción de agua subterránea-, fue capaz de funcionar adecuadamente. Se utilizaron dos paneles fotovoltaicos de 20 w conectados en paralelo, un tempo control de 36-12 v, una batería y un inversor de 12-110 v. El sistema fotovoltaico fue capaz de producir 498.65 w, de los cuales el dispositivo de OI solo consume 205.7 w y el DS fue considerado de cero por su baja producción.

El DS alcanzó una producción de 2.7 L/día de agua tratada, mientras que en la OI fue de 113.5 L/día. Si se considera, de acuerdo con datos de la OMS, que una persona necesita en promedio 20 L/día de agua para cubrir sus necesidades, el dispositivo de OI puede utilizarse para cumplir ese propósito, resultando viable su implementación en lugares donde la energía eléctrica no llega. El objetivo de obtener agua tratada, baja en sales, a nivel laboratorio fue cumplido exitosamente por el DS. Los costos que presentaron las aguas tratadas fueron de \$5.18/L para el dispositivo de DS y \$2.89/L de la OI, siendo \$2.29/L más barata el agua obtenida con la OI en relación con la DS.

En relación con las fuentes de agua analizadas, se encontró una alta variación en los valores de salinidad de las aguas subterráneas en La Ciénega de Chapala, Michoacán. En los análisis físico-químicos y químicos se obtuvieron niveles de salinidad desde bajos a muy altos. Ambos dispositivos fueron puestos a prueba con estas aguas obteniendo resultados eficientes en los tratamientos, sin embargo se observó que la eficiencia varía según el tipo de muestra. Los parámetros analizados fueron pH, C.E., SDT, Dureza, cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), aniones

(CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}), metales pesados (Fe, Cu, Mn, Zn), P, B y N-NH_4^+ . No se detectó presencia de metales pesados en ningún punto de muestreo.

Comparando ambos dispositivos, la eficiencia del DS fue mayor en los siguientes parámetros:

- CE, la cual redujo en un 18.12% más en relación con la ósmosis inversa (OI).
- SDT, con una reducción 10.6% más en relación con la ósmosis inversa (OI).
- B, con reducción de 89.87% más en relación con la ósmosis inversa (OI).
- P, con una reducción de 34.78% más en relación con la ósmosis inversa (OI).

El N-NH_4^+ fue el único parámetro que el proceso de DS no pudo remover.

Por otra parte, la OI obtuvo mayor eficiencia en otros parámetros, los cuales fueron:

- Cl^- con un 7.67% más.
- HCO_3^- reduciendo un 7.67% más.
- SO_4^{2-} 44% más.
- pH reduciéndolo hasta un 25.26%.

En el dispositivo de OI, el B fue el único parámetro que no pudo ser removido. La remoción de los iones Ca^{+2} , K^+ , CO_3^{-2} y Dureza fue de 100% con ambos dispositivos, mientras que para el Na^+ y Mg^{+2} las diferencias de remoción fueron cercanas de 0.9%.

Se concluye, entonces, que ambos dispositivos cumplieron con el objetivo de desalinizar el agua subterránea, como puede observarse en los valores de la CE en las aguas tratadas. Las aguas tratadas por los dispositivos pueden ser utilizadas para uso agrícola, entre otros usos, considerando los parámetros que pueden y no pueden ser eliminados o dependiendo de las necesidades que se tengan. Potencialmente, las aguas tratadas con los dos dispositivos podrían

utilizarse para uso y consumo humano pero requieren evaluaciones adicionales como las microbiológicas y considerar fuentes con baja concentración de N-NH_4^+ y B.

Para la futura implementación de alguna de estas tecnologías en el sector agrícola de la zona Ciénega de Chapala, Michoacán, se recomienda la DS, ya que en muchas de las muestras de agua subterráneas analizadas, se logró detectar cantidades tóxicas de boro y de entre ambos procesos este es el único capaz de removerlo.

El análisis de ciclo de vida (ACV) realizado mostró el impacto ambiental de ambos dispositivos considerando que operan durante toda la vida útil, trabajando de 8:00 a las 18:00. Se demostró que pueden ser implementados ambos dispositivos en la zona, ya que son de bajo impacto con referencia a los emitidos a una casa bimestralmente. En términos generales, el dispositivo de destilación solar generó los menores impactos en cuanto a los parámetros de acidificación (SO_2), consumo energético y huella de carbono (CO_2).

Referencias

- Agrelo, M. (2016). ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA: METODOLOGÍA CLAVE EN EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO. Retrieved from <http://www.eco-huella.com/2014/06/analisis-ciclo-vida.html>
- Akash, B. A., Mohsen, M. S., & Nayfeh, W. (2000). Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions. *Energy Conversion and Management*, 41(9), 883–890. [http://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00158-2](http://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00158-2)
- Al-Hayeka, I., & Badran, O. O. (2004). The effect of using different designs of solar stills on water distillation. *Desalination*, 169(2), 121–127. <http://doi.org/10.1016/j.desal.2004.08.013>
- Armendáriz, S. I., Gándara, M. Á. P., Foster, R. E., Koutsoukos, P. G., Margulis, R. G. B., & Alonso, G. (2003). Comportamiento isotérmico de la precipitación salina en un destilador solar experimental. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 47(3), 287–294. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47547314>
- Ashby, M. F. (2009). *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice* (ELSEVIER). Oxford.
- Beade Ruelas, Alma. García Soto, C. E. (2016). Calentadores solares de agua. Usa la energía solar a tu favor. Retrieved from http://www.profeco.gob.mx/encuesta/brujula/bruj_2016/bol325_calentadores_solares.asp
- C, Esteban. J, Franco. A, F. (2010). EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR COLECTOR SOLAR ACUMULADOR. *Avances En Energía Renovable Y Medio Ambiente.*, 6, 0–2.
- Carballo Guerrero, D. (2011). Universidad veracruzana. *Tesis*, 1(COMPARACION

DE DOS DILUYENTES COMERCIALES PARA CRIOPRESERVAR SEMEN DE BOVINO BAJO CONDICIONES DE CAMPO EN EL TRÓPICO HÚMEDO), 27.

CFE. (2016). CFE. Retrieved from

http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_casa.asp

Chávez Alcántar, A., Velázquez-Machuca, M., Pimentel Equihua, J. L., Venegas-González, J. Montañez Soto, J. L., & y Vázquez Gálvez, G. (2010). CHAPALA E ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA Hydrochemistry of Surface Water in the Cienega of Chapala and Water Quality Index, 83–94.

Claudio A. Estrada gasca y Camilo A. Arancibia Bulnes. (2010). Las Energías Renovables : la Energía Solar y sus Aplicaciones. *Revista Digital Universitaria*, 1–27. Retrieved from

<http://www.revista.unam.mx/vol.11/num10/art96/index.html?>

Conagua. (2011). Agua en el mundo. *Estadísticas Del Agua En México*, 113–126. Retrieved from

http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/SINA/Capitulo_8.pdf

Conocido, N. (n.d.). Análisis del ciclo de vida. In *CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA* (p. 37). Costa rica. Retrieved from <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6827/04CAPITOL3.pdf;jsessionid=D2BD525881DDD7447A552C05CDB8CD3C?sequence=4>

Cottier Primo, L. J. (2011). “*Descripción de los procedimientos de instalación, operación y mantenimiento de la planta desalinizadora piloto del proyecto IMPULSA IV; Viabilidad de incorporación de energía solar fotovoltaica en el sistema.* Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from <http://docplayer.es/6831563-Tesis-universidad-nacional-autonoma-de-mexico-facultad-de-ingenieria.html>

De la Cruz, C. (2006). *La desalinización de agua de mar mediante el empleo de*

energías renovables. La desalinización de agua de mar mediante el empleo de energías renovables (Fundación). Madrid, España.

De la Cruz Hernández, D. A. (2013). Eliminación de sales de diferentes fuentes de agua utilizando un destilador solar portátil de cristal filtra sol. *Tesis*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Dev, R., Abdul-Wahab, S. A., & Tiwari, G. N. (2011). Performance study of the inverted absorber solar still with water depth and total dissolved solid. *Applied Energy*, 88(1), 252–264. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.08.001>

Dévora Isordia, G. E., & ; González Enríquez, Rodrigo; Ponce Fernández, N. E. (2012). Técnicas Para Desalinizar Agua De Mar Y Su Desarrollo En México. *Ra Ximhai*, 8, 57–68. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46123333006>

Estrada Godoy, F. (2008). *Calidad química del agua subterránea como factor de degradación de suelos de la ciénega de chapala*. IPN.

Fath, H. E. S. (1998). Solar distillation: a promising alternative for water provision with free energy, simple technology and a clean environment. *Desalination*, 116(1), 45–56. [http://doi.org/10.1016/S0011-9164\(98\)00056-3](http://doi.org/10.1016/S0011-9164(98)00056-3)

Flores Estrada, M. (2013). Competitividad en México, Territorios y Regiones. SAGARPA. Retrieved from http://www.foroconsultivo.org.mx/eventos_realizados/ciclo_talleres_competitividad/taller_3/martha_flores_estrada.pdf

Flores Nocolaide, R. C. (2015). *Diseño y construcción de un prototipo destilador de agua, utilizando energía solar*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Quito. Retrieved from <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8613/6/UPS-KT01069.pdf>

Fuentes Diaz, M. (2005). *Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua, segunda parte*. México D.f. Retrieved from

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SistemasTerciarios.pdf>

García, A. P. (2007). Una perspectiva social de la problemática del agua. *UNAM, Boletín* 62, 125–137.

Geoffrey, L. (2011). Agua dulce. *PNUMA*, 24. Retrieved from http://www.unep.org/pdf/Tunza_10.4-Spa-SMLR.pdf

Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B., & Moulin, P. (2009). Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*, 43(9), 2317–2348. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.010>

Hernández, A. Tejerina, F. Arribas, J.I. Martínez, L. Martínez, F. (1990). *Microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa* (Vomen 4). Madrid: LERKO PRINT, S.A. Madrid. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=jZ0Z9-G8YdoC&oi=fnd&pg=PA11&dq=osmosis+y+osmosis+inversa&ots=E7HuevUw5v&sig=PyHdCC-Ig-hzgXerrM-rqU6a5u0#v=onepage&q=osmosis+y+osmosis+inversa&f=false>

Herold, D., & Neskakis, A. (2001). A small PV-driven reverse osmosis desalination plant on the island of Gran Canaria. *Desalination*, 137(1–3), 285–292. [http://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00230-2](http://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00230-2)

Hrayshat, E. S. (2008). Brackish water desalination by a stand alone reverse osmosis desalination unit powered by photovoltaic solar energy. *Renewable Energy*, 33(8), 1784–1790. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2007.11.001>

Iannetta, Massimo. Colonna, N. (2016). Salinización. *Science Towards Application*, 3(1), 4. Retrieved from http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/Leaflets/B3_Leaflet_ES.pdf

Instituto Nacional de Estadística, G. e I. (INEGI). (2014). No Title. Retrieved from <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mich/economia/default>.

aspx?tema=me&e=16#sp

- Jiménez Herrero, L. M. (2007). Manual de cálculo y reducción de Huella de Carbono en el sector del comercio. *Estudios Gráficos Europeos*, 65. Retrieved from www.rincondelgenio.com
- Kelley, L. C., & Dubowsky, S. (2013). Thermal control to maximize photovoltaic powered reverse osmosis desalination systems productivity. *Desalination*, 314, 10–19. <http://doi.org/10.1016/j.desal.2012.11.036>
- Kershman, S. A., Rheinlander, J., & Gabler, H. (2003). Seawater reverse osmosis powered from renewable energy sources - Hybrid wind/photovoltaic/grid power supply for small-scale desalination in Libya. *Desalination*, 153(1–3), 17–23. [http://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01089-5](http://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01089-5)
- Kořtuniewicz, A. (2006). The history and state of arts in membrane technologies. *Institute of Chemical Engineering*. Retrieved from http://www.etseq.urv.es/assignatures/ops/presentacio_membranes.pdf
- Lee, K. P., Arnot, T. C., & Mattia, D. (2011). A review of reverse osmosis membrane materials for desalination-Development to date and future potential. *Journal of Membrane Science*, 370(1–2), 1–22. <http://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.12.036>
- Manuel, O. J. (2001). La ósmosis inversa como proceso de potabilización en España. In *XXII CONGRESO DE CENTROAMERICA Y PANAMA DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL* (p. 5). Madrid. Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/centroa22/Ponencia31.pdf>
- Martinez-Lopez, A. G., Padrón-Hernández, W., Rodríguez-Bernal, O. F., Chiquito-Coyotl, O., Escarola-Rosas, M. A., Hernández-Lara, J. M., ... Martínez-Castillo, J. (2014). Alternativas actuales del manejo de lixiviados. *Avances En Quimica*, 9(1), 37–47.
- Mazzeo, N., Clemente, J., García-Rodríguez, F., Gorga, J., Kruk, C., Larrea, D., ...

- Scasso, F. (2002). Eutrofización: causas, consecuencias y manejo. *Perfil Ambiental Del Uruguay*. Retrieved from <http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/pasantias/eutrofizacion.pdf>
- Melrose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2015). EVALUACION DEL MÉTODO DE ÓSMOSIS INVERSA COMO COMPLEMENTO AL SISTEMA CONVENCIONAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS PARA LA GENERACION DE VAPOR Y ENERGIA DE UNA PLANTA DE EXTRACCION DE ACEITE DE PALMA. *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015*, 1. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- NatureFund. (2016). Calculador de carbón. Retrieved from http://www.naturefund.de/es/tierra/calculador_de_co2/calculador_de_co2_vivienda.html
- Paul W. Stackhouse, Jr., P. D. (2016). Surface meteorology and Solar Energy. A renewable energy resource web site (release 6.0). Retrieved from <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- Rajvanshi, A. K. (1981). Effect of various dyes on solar distillation. *Solar Energy*, 27(1), 51–65. [http://doi.org/10.1016/0038-092X\(81\)90020-7](http://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90020-7)
- Rao, S. M. (1970). Reverse osmosis. *Journal of Hydrology*, 12(5), 68–69. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90042-9](http://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90042-9)
- Rodie, E., & Hardenberg. (2001). Tratamiento de aguas residuales. *Ingenieria Sanitaria*, 13. Retrieved from http://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0,5&q=aguas+residuales+“concepto”
- Rodriguez Fernández-Alba, A., Letón García, P., Rosal García, R., Dorado Valiño, M., Villar Fernández, S., & Sanz García, J. M. (2006). *Tratamientos Avanzados De Aguas Residuales Industriales*. *Citme*. <http://doi.org/M-30985-2006>

- Rojas, R. (2002). Sistemas de tratamiento de aguas residuales. *CURSO INTERNACIONAL "GESTION INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES"(2002: Brasil). Curso Internacional. Brasil: Cepis, 19, 19.*
- Romero, B. (2003). El Analisis del Ciclo de Vida y la Gestion Ambiental. *Dyna, 1, 1–7*. Retrieved from <http://www.ineel.mx/boletin032003/tend.pdf>
- Rufes Martínez, P. (2010). *Energía solar térmica: Técnica para su Aprovechamiento* (Colección). Barcelona: morcombo. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=fllc3xuVIUYC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Energ%C3%ADa+solar+termica+&ots=apFkdcEFuJ&sig=yOobqm6RoYdQzbJgUhrGeSiY94o#v=onepage&q&f=false>
- Sánchez Vega, O. G. (2014). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE OZONIFICACIÓN PARA PURIFICACIÓN DE AGUA ALIMENTADO CON ENERGÍA SOLAR*. IPN.
- SEMARNAT. (2009). *Programa Hídrico Regional Visión 2030 Programa Hídrico Regional Visión 2030*.
- SEMARNAT. (2012). Agua Agua, 60. Retrieved from http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap6_agua.pdf
- Semarnat-Conagua. (2015). Cuidemos y valoremos el agua que mueve a México. *Agua Y Desarrollo Sostenible, 25*. Retrieved from http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/carrera_agua_2015.pdf
- Silva-García, J. T., Ochoa-Estrada, S., Cristóbal-Acevedo, D., & Estrada-Godoy, F. (2006). Calidad química del agua subterránea de la ciénega de Chapala como factor de degradación del suelo. *Terra Latinoamericana, 24(4)*, 503–513. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57324408>
- Silvia García, J. T., Rodríguez Castillo, R., Ochoa Estrada, S., & López Díaz, S. (2002). Lake Chapala and the Cienega aquifer: Chemical evidence of

- hydraulic communication. *Geofísica Internacional*, 41(1), 63–74. Retrieved from <http://www.aguaenmexico.org/images/estados10enero/Jalisco/Lake Chapala and Cienaga aquifer.pdf>
- Sklavos, S., Gatidou, G., Stasinakis, A. S., & Haralambopoulos, D. (2015). Use of solar distillation for olive mill wastewater drying and recovery of polyphenolic compounds. *Journal of Environmental Management*, 162, 46–52. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.034>
- Sodha, M. S., Kumar, A., Tiwari, G. N., & Tyagi, R. C. (1981). Simple multiple wick solar still: Analysis and performance. *Solar Energy*, 26(2), 127–131. [http://doi.org/10.1016/0038-092X\(81\)90075-X](http://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90075-X)
- Solidworks. (2016). Apéndice C: Herramientas y métodos de evaluación del ciclo de vida (LCA). Retrieved from http://www.solidworks.es/sustainability/sustainable-design-guide/3007_ESN_HTML.htm
- Statistik, B. P. (2014). A HARDY-YIELD SOLAR DISTILLER OF BRACKISH WATER. *Katalog BPS*, XXXIII(2), 81–87. <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Thomson, M., & Infield, D. (2005). A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries. *Desalination*, 183(1–3), 105–111. <http://doi.org/10.1016/j.desal.2005.03.031>
- Tiwari, G. N., Singh, H. N., & Tripathi, R. (2003). Present status of solar distillation. *Solar Energy*, 75(5), 367–373. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.005>
- Toledo, A. (1999). El agua en México y el mundo, 9–18.
- Unesco. (2016). La crisis mundial del agua. Retrieved from http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr1/pdf/chap1_es.pdf
- Velázquez, Martha A. , José Pimentel, L. y O. M. (2011). ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE BORO EN FUENTES DE AGUA DE LA CUENCA DEL

RÍO DUERO, MÉXICO, UTILIZANDO ANÁLISIS ESTADÍSTICO
MULTIVARIADO, 27(1), 41–46.

Vera Cabezas, Pan Yailyn, Luisa Mayra. Gómez, Y. (2009). Desalación de agua de mar. solución del futuro. *Tecnología Química*, 29(2), 28–33. Retrieved from revista.tec.qi?mica@fiq.uo.edu.cu

Vourch, M., Balannec, B., Chaufer, B., & Dorange, G. (2008). Treatment of dairy industry wastewater by reverse osmosis for water reuse. *Desalination*, 219(1–3), 190–202. <http://doi.org/10.1016/j.desal.2007.05.013>

Wegelin, M., & Sommer, B. (1998). Solar Water Disinfection (SODIS)—destined for worldwide use? *Waterlines*, 16(3), 30–32.

Westcot, R. S. A. D. W. (1989). *Water quality for agriculture* (Rev 1). Roma, Italia: Estudio FAO Riego y Drenaje 29.

Yabroudi, S. C., Cárdenas, C., Aldana, L., Núñez, J., & Herrera, L. (2011). Desalinización de agua empleando un destilador solar tubular. *Interciencia*, 36(10), 731–737.