



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



*“Tratamiento experimental del efluente secundario
(Planta Sur) para recarga de acuíferos mediante un
destilador escalonado”*

POR:

JUAN CARLOS CASTAÑEDA PEREA

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA**



CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

DICIEMBRE 2022



"Tratamiento experimental del efluente secundario (Planta Sur) para recarga de acuíferos mediante un destilador escalonado" presentado por Juan Carlos Castañeda Perea como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, ha sido aprobado y aceptado por:

M.I. Fabián Vinicio Hernández Martínez

Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Fernando Martínez Reyes

Secretario de Investigación y Posgrado

M. I. Miguel Ángel González Núñez

Coordinador Académico

Dra. María Socorro Espino Valdés

Directora de Tesis

Diciembre 2022

COMITÉ

Dra. María Socorro Espino Valdés

Dra. Mélida Gutiérrez Quiroz, revisor externo

Dr. Humberto Silva Hidalgo, revisor

Dr. Adán Pinales Munguía, revisor



ING. JUAN CARLOS CASTAÑEDA PEREA

Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por la Directora **Dra. María Socorro Espino Valdés** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **“TRATAMIENTO EXPERIMENTAL DEL EFLUENTE SECUNDARIO (PLANTA SUR) PARA RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE UN DESTILADOR ESCALONADO”**.

Índice de Contenido

Índice de Contenido

Agradecimientos

Dedicatoria

Resumen

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Introducción

1.2 Justificación

1.3 Objetivo general

1.4 Objetivos específicos

1.5 Hipótesis

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Recarga artificial de acuíferos

2.2 Requisitos para la recarga

2.3 Calidad de agua

2.4 Tratamiento de agua

2.5 Energía solar

2.6 Destilación solar



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 3. Materiales y métodos

- 3.1 Procedimiento de construcción y equipamiento del destilador
- 3.2 Estación climatológica
- 3.3 Ubicación del prototipo
- 3.4 Primera etapa experimental
- 3.5 Segunda etapa

Capítulo 4. Resultados y discusión

- 4.1 Análisis de entrada y salida del destilador. Primera etapa (AP)
- 4.2 Segunda etapa
- 4.3 Análisis final de laboratorio en muestra compuesta

Capítulo 5. Conclusión y recomendaciones

- 5.1 Conclusiones
- 5.2 Recomendaciones

Bibliografía

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE
"Naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

**M.I. FABIÁN VINICIO HERNÁNDEZ
MARTÍNEZ**

**EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO**

**FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.**



DIRECCIÓN

DR. FERNANDO MARTÍNEZ REYES

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx



Agradecimientos

Agradezco primero a Dios por haberme dado salud y la posibilidad de terminar la Maestría en Ingeniería en Hidrología. Así como a mis padres por haberme dado apoyo tanto emocional como monetario y nunca haberme dejado ceder ante nada. Agradezco especialmente a mi esposa por estar apoyándome y ayudándome a siempre ser una mejor persona.

Agradezco al personal de la Facultad de Ingeniería por la ayuda tanto en revisión de documentos, bibliografía y la facilidad de hacer los análisis en el Laboratorio de Sanitaria, con especial agradecimiento a la Dra. María Socorro Espino Valdés.

Como último agradezco a las instituciones foráneas a la escuela que me apoyaron con el trabajo, Ventanarama, Constructora Ortiz y a la Planta de Tratamiento Sur en especial al ingeniero Miguel Navarro por facilitarme la entrada para la colección de muestras de agua tratada.



Dedicatoria

El trabajo está dedicado al público e investigadores que tengan algún interés en tomar medidas contra la escasez de agua en el estado. Pero está dedicada especialmente a mi esposa e hijo, que gracias a mi familia siempre tendré un motivo para el cual superarme como profesionalista.



Resumen

Los problemas relacionados al recurso hídrico en el norte del país han ido creciendo con el paso de los años; los acuíferos tienen menor cantidad de agua y de menor calidad, la población ejerce más presión en la necesidad del recurso por el aumento población y el descuido ecológico. En Chihuahua la mayor cantidad de agua que es utilizada es agua subterránea; sin embargo, con los problemas de sobreexplotación ejercidos los acuíferos se han ido quedado sin disponibilidad. Una de las medidas que nos ayudan a revertir los problemas causados por la sobreexplotación de agua es la recarga artificial de acuíferos. Existen varios métodos para realizar un procedimiento de recarga artificial, que puede ser superficial, subsuperficial o subterránea. La recarga artificial puede variar dependiendo del método de aplicación y de esto depende la fuente y calidad de agua que se necesita. Unas de las principales fuentes de recarga son los efluentes provenientes de las plantas de tratamiento; sin embargo, los desafíos que presentan estas plantas son el cumplimiento con los límites permisibles que la normatividad mexicana maneja y regula para la recarga artificial de acuíferos. En la ciudad de Chihuahua las plantas de tratamiento son de tipo secundario, produciendo así un efluente con algunos parámetros que superan los límites permisibles de la normatividad mexicana. La destilación solar puede emplearse como un tratamiento terciario que utiliza la energía solar para eliminar o reducir los contaminantes en el agua. Existen varias formas de construir un destilador; uno de ellos es el destilador solar escalonado o en cascada, el cual genera un flujo constante de agua que se continúa evaporando, condensando y precipitando; de esta forma la eficiencia y eficacia del ciclo en el destilado es mayor a la de un destilador convencional.

Para este proyecto se construyó y trabajó con un destilador solar escalonado con el objetivo de mejorar la calidad del agua, maximizar la producción y comprobar las ventajas que ofrece este tipo de sistema con los destiladores convencionales anteriormente utilizados, así mismo comprobar los materiales óptimos para la construcción de dicho destilador.



Al concluir de construir el destilador se procedió a realizar pruebas para probar el funcionamiento de éste y de los materiales utilizados, comprobando qué tipo de materiales no eran muy adecuados y cuáles ayudaban en el proceso. Las primeras pruebas se realizaron con agua potable para poder estabilizar el destilador, luego se continuó con las pruebas con agua del efluente de la Planta de Tratamiento Sur de la ciudad de Chihuahua. Durante las dos etapas de pruebas se colectaron simultáneamente los datos climatológicos en el lugar del estudio. Al finalizar dichas pruebas se recolectaron muestras para realizar análisis a las propiedades del agua y poder compararlas con los límites permisibles de la *NOM-014-CONAGUA-2003* para recarga artificial de acuíferos con agua tratada. Todos los parámetros analizados cumplieron con los límites permisibles de dicha norma, comprobando la efectividad del destilador y cumpliendo con los objetivos de la investigación.



Índice de contenido

Contenido

Agradecimientos.....	II
Dedicatoria	III
Resumen.....	IV
Capítulo 1. Generalidades.....	10
1.1 Introducción.....	10
1.2 Justificación.....	12
1.3 Objetivo general	12
1.4 Objetivos Específicos	13
1.5 Hipótesis	13
Capítulo 2. Marco Teórico	14
2.1 Recarga artificial de acuíferos.....	14
2.1.1 Clasificación de la recarga según la norma oficial mexicana NOM-014- CONAGUA-2003	15
2.1.2 Criterios de diseño para pozos de infiltración.....	15
2.2 Requisitos para la recarga	16
2.2.1 Localización de la obra.....	16
2.2.2 Fuente de agua de recarga	17
2.2.3 Hidrología de la zona	17
2.2.4 Permiso de infiltración.....	17
2.2.5 Monitoreo	18
2.3 Calidad de agua	18
2.4 Tratamiento de agua	20



2.4.1 Tratamiento primario	20
2.4.2 Tratamiento secundario.....	21
2.4.3 Tratamiento terciario	22
2.5 Energía solar.....	23
Radiación solar	24
2.6 Destilación solar.....	25
2.6.1 Factores que afectan la productividad de los destiladores solares	27
2.6.2 Destilador solar escalonado.....	28
Capítulo 3. Materiales y métodos	31
3.1 Procedimiento de construcción y equipamiento del destilador.....	31
3.1.1 Mesa metálica	31
3.1.2 Cubierta de vidrio	32
3.1.3 Escalera	33
3.1.4 Depósito de agua	35
3.1.5 Recolector de agua	35
3.2 Estación climatológica.....	37
3.3 Ubicación del prototipo.....	38
3.4 Primera etapa experimental	39
3.4.1 Funcionamiento del destilador con agua potable (AP).....	40
3.5 Segunda etapa.....	42
3.5.1 Periodo experimental con agua tratada (AT).....	42
Capítulo 4. Resultados y discusión	43
4.1 Análisis de entrada y salida del destilador. Primera etapa (AP).....	43
4.2 Segunda etapa.....	45
4.2.1 Periodo de prueba con agua tratada (AT).....	45



4.3	Análisis final de laboratorio en muestra compuesta	49
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....		53
5.1	Conclusiones.....	53
5.2	Recomendaciones.....	54
Bibliografía		55

Índice de figuras

Figura 1.-	Radiación solar.	25
Figura 2.-	Destilador solar convencional de dos aguas (Kumar, 2020).....	27
Figura 3.-	Destilador solar escalonado o en cascada.....	30
Figura 4.-	Mesa metálica de apoyo para el destilador.....	31
Figura 5.-	Caja y tapa de vidrio que forman la estructura exterior del destilador....	32
Figura 6.-	Pinza para sellar la tapa con la caja de vidrio.	33
Figura 7.-	Escalera de madera.	34
Figura 8.-	Escalera ya cubierta por acero inoxidable.	34
Figura 9.-	Recolector de agua potable.	36
Figura 10.-	Estación climatológica en el lugar de trabajo.	37
Figura 11.-	Termómetro para medir la temperatura interior del destilador.	38
Figura 12.-	Ubicación del lugar de trabajo.....	39
Figura 13.-	Destilador en funcionamiento.....	41
Figura 14.-	Comparación del color de agua entre el agua del efluente y del afluente del destilador.....	51



Índice de tablas

Tabla 1.- Especificaciones del agua residual utilizada en la recarga de acuíferos	19
Tabla 2.- Primer período de recolección de datos, con agua potable de entrada.	43
Tabla 3.- Segundo periodo de recolección de datos, con agua potable de entrada.	44
Tabla 4.- Primeros datos obtenidos de la estación climatológica, correspondientes a los días de la segunda toma de parámetros.....	44
Tabla 5.- Resultados de primera prueba de destilación con agua tratada (AT-1) .	46
Tabla 6.- Parámetros climáticos durante la prueba con agua del Efluente. Etapa AT-1	46
Tabla 7.- Resultados de primera prueba de destilación con agua tratada (AT-2).	47
Tabla 8.-Parámetros climáticos durante la prueba con agua del Efluente. Etapa AT-2.	48
Tabla 9.- Resultados del análisis químico del efluente de la planta sur y del efluente del destilador.	49
Tabla 10.- Comparación de los resultados obtenidos con los parámetros de la norma.	50

Índice de gráficos

Gráfico 1.- Comparación de conductividad eléctrica de entrada y salida del destilador en la etapa de pruebas con agua potable.	45
Gráfico 2.- Comparación de conductividad eléctrica de entrada y salida del destilador en el segundo período de pruebas con agua potable.	45
Gráfico 3.- Comparación de conductividad eléctrica de entrada y salida del destilador en la etapa de prueba con agua tratada.	47
Gráfico 4.- Comparación de conductividad eléctrica de entrada y salida de la segunda etapa de agua tratada.....	48



Capítulo 1. Generalidades

1.1 Introducción

El agua es un recurso limitado en el planeta ya que aproximadamente el 97 % es salada, en tanto que la mayor parte del agua dulce se encuentra en los casquetes polares, esto es, aproximadamente el 2% del total. Por su parte, el agua subterránea sólo constituye al 0.5 % del total; el restante 0.5% corresponde al agua superficial. El agua subterránea es la principal fuente de consumo para la población que habita las zonas áridas y semiáridas del planeta. El uso intensivo del líquido ha llevado a la sociedad a una problemática que afecta a prácticamente todas las regiones productivas del mundo y esta sobreexplotación se manifiesta en una baja disponibilidad y la creciente presencia de contaminantes, generando una situación insostenible (Auge, 2006).

Los conceptos sobreexplotación y contaminación poseen variedad de alcances de acuerdo al enfoque particular de los especialistas o a la finalidad que se persiga con el aprovechamiento del agua subterránea. Así, por sobreexplotación suele entenderse un exceso en la extracción que afecta las reservas permanentes, debido a que supera con amplitud y durante lapsos prolongados a la magnitud de las reservas renovables. Respecto del concepto de contaminación, se incluye a todo proceso que genere un deterioro apreciable en la calidad física, química y/o biológica del agua subterránea. Generalmente la contaminación deriva de acciones artificiales, aunque a veces tiene origen natural (Gútiérrez, 2016).

La sobreexplotación del agua en México constituye un problema grave, principalmente en el norte de la república, donde las precipitaciones son bajas y las temporadas secas son constantes. En México se ubican 653 acuíferos de los cuales 257 están sin disponibilidad. El estado de Chihuahua cuenta con 61 acuíferos; de ellos, 41 se encuentran con déficit (DOF, 2020).

La recarga artificial de acuíferos es un conjunto de técnicas que permiten, mediante la intervención programada e introducción directa o indirecta en un acuífero, incrementar la disponibilidad de los recursos hídricos, así como actuar sobre su calidad (Gútiérrez, 2016).



La aplicación más usual de la recarga artificial de acuíferos consiste en el almacenamiento subterráneo de escorrentías superficiales no reguladas, así como el aprovechamiento de las propiedades del suelo y de la zona no saturada como elemento de tratamiento para aguas tanto potables como residuales que logran la reducción o eliminación del descenso piezométrico (Escalante & Garcia, 2004).

Antes de iniciar la recarga de un acuífero se debe contemplar que el agua que se utilizará tenga las características necesarias para poder ser usada posteriormente. De lo contrario estaríamos inyectando agua con contaminantes que pondrían en riesgo a los acuíferos recargados (Escalante & Garcia, 2004).

La destilación solar del agua es un mecanismo similar al de la naturaleza que purifica el agua. La energía del sol calienta el agua hasta el punto de evaporación, el vapor de agua purificado se eleva y se condensa en la superficie del cristal para su colección. Mediante este proceso, se remueven impurezas tales como sales y metales pesados y se destruyen o eliminan los microorganismos. Como producto final se puede obtener agua con calidad para uso y consumo humano. (Santana & Foster, 2014).

Mediante estudios previos realizados en la Universidad Autónoma de Chihuahua sobre los efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la ciudad de Chihuahua se logró la remoción de metales pesados, sales y materia orgánica en forma significativa empleando el método de destilación solar en un sistema experimental de doble vertiente (Dagda, 2017; Holguín, 2019). Dichos trabajos presentan los resultados de un equipo de destilación operado en lote, comúnmente llamado “sistema batch”. Los resultados obtenidos presentan el reto de probar si es posible mejorar la eficiencia y facilitar la operación del sistema de destilación trabajando en flujo continuo, lo que puede llevarse a cabo a través de un destilador solar en escalera. Esto, de modo que cumpla con un proceso continuo de descontaminación cuyo resultado sea agua residual tratada.



1.2 Justificación

En el estado de Chihuahua el 40% del área posee clima muy seco. La temperatura media anual es de 24°C, las temperaturas más altas superan los 35°C en verano y la precipitación media anual estatal es de 381.2 mm (Martínez, 2019).

El clima seco genera un problema en la calidad del agua y en el abastecimiento de ésta. La falta de precipitación en el estado de Chihuahua y el manejo no sustentable del agua subterránea se manifiesta como un déficit en 41 de 61 acuíferos el cual se refleja en el descenso en los niveles piezométricos respecto al tiempo y un deterioro en la calidad del agua (DOF, 2020).

Ante la problemática creciente de sobreexplotación del agua subterránea se ha planteado la alternativa de recargar los acuíferos con diferentes tipos de agua, incluyendo las aguas residuales tratadas. A este respecto, la normatividad mexicana para recarga con agua tratada (NOM-014-CONAGUA-2003) establece el requerimiento de que ésta cumpla con los criterios de potabilidad definidos en la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Chihuahua son de tipo secundario, por lo que sus efluentes son adecuados para el riego urbano de jardines y de áreas agrícolas. Sin embargo, poseen ciertas características cualitativas que indican que no son aptos para recarga, para lo cual sería necesario someter dichos efluentes a un tratamiento terciario. Se ha planteado como una posible alternativa la utilización del proceso de destilación solar mediante el cual dicho recurso hídrico lograría una calidad adecuada para poder reutilizarlo. Se considera que el empleo de un sistema de destilación solar en cascada o escalera es capaz de mejorar la producción y de facilitar un mantenimiento más eficiente que los sistemas probados con anterioridad. La utilización de sistemas piloto para probar esta metodología puede generar información útil para la solución de uno de los problemas más importante en el estado de Chihuahua.

1.3 Objetivo general

Construir y operar un prototipo de destilador solar en escalera para realizar un tratamiento terciario en el efluente de la planta de tratamiento Sur en Chihuahua



(PS), con la finalidad de mejorar la calidad del agua, maximizar la producción y comprobar las ventajas que ofrece este tipo de sistema con los destiladores convencionales anteriormente utilizados.

1.4 Objetivos Específicos

- Diseñar un modelo de un destilador en escalera con la capacidad y eficiencia necesaria para el estudio, identificando los materiales apropiados para una operación adecuada del instrumento.
- Construir el prototipo experimental del destilador solar en escalera para su operación como tratamiento adicional del efluente secundario de la planta Sur.
- Instalar el destilador en el sitio de trabajo junto con el equipo de medición de datos climatológicos requerido.
- Realizar pruebas de tratabilidad en el prototipo consistentes en alimentación del efluente secundario mediante flujo continuo durante las horas de radiación solar.
- Analizar la calidad del agua del flujo de salida y entrada del destilador para compararla con los parámetros establecidos en la Norma Oficial Mexicana para agua destinada al consumo humano.

1.5 Hipótesis

El tratamiento terciario mediante el proceso de la destilación solar en escalera del efluente de la Planta de Tratamiento Sur de la ciudad de Chihuahua (PS) mejora la calidad del agua a un nivel tal que es apta para realizar obras de recarga de acuíferos y presenta ventajas operacionales en relación al destilador solar convencional sin flujo continuo.



Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Recarga artificial de acuíferos

La recarga artificial de acuíferos son un conjunto de técnicas hidrogeológicas cuyo propósito es infiltrar aguas superficiales hacia un cuerpo de agua subterráneo, de tal modo que interfiere en el ciclo hidrológico. Logrando así, una gestión más racional del recurso hídrico del acuífero, permitiendo: restaurar acuíferos sobreexplotados, conservar o disminuir los impactos de crecidas, almacenamiento y distribución del agua, tratamiento de las aguas residuales mediante un proceso de terciario y mejorar la calidad de agua superficial, aprovechando la capacidad de la zona no saturada para reducir los contaminantes (Chávez, 2011).

Los factores importantes en los estudios hidrogeológicos para la recarga artificial, son: estructuras que forman el acuífero, fallas, niveles piezométricos y profundidades de los estratos, permeabilidad, porosidad efectiva, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, características químicas de las rocas presentes en la formación geológica. Entre las estructuras geológicas más empleadas sobresalen aquellas que tienen una mayor permeabilidad, por el hecho de que presentan una menor oposición al paso del agua de recarga (DOF, 2009). Entre ellas se encuentran:

- *Depósitos de origen aluvial*: se generan principalmente en los ríos y están formados por gravas, arenas, limos y arcillas.
- *Depósitos de origen eólico*: están formados por arenas de un tamaño uniforme permitiendo alcanzar grandes tasas de recarga, por ejemplo, dunas.
- *Depósitos de origen tectónico*: son de origen lacustre, eólico, glacial o piroclástico, se ubican en las depresiones del terreno donde se deposita material fino muy permeable. Además, contienen grandes reservas de agua dulce.

Calizas o dolomitas muy fracturadas o kársticas: tienen bajo almacenamiento, otorgan altos caudales de infiltración y pocos problemas asociados a la colmatación. Poseen un bajo poder de depuración físico, químico y biológico (Morales, 2011).



2.1.1 Clasificación de la recarga según la norma oficial mexicana NOM-014-CONAGUA-2003

Los tipos de recarga artificial para la “NOM-014-CONAGUA-2003, *Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada*” se clasifican como:

Superficial: consiste en la recarga desde la superficie por infiltración en obras como: estanques o piletas de infiltración, inundación del terreno, cauces acondicionados, zanjas, sobre riego o una combinación de ellas.

Subsuperficial: consiste en la introducción del agua en la zona no saturada mediante pozos secos, zanjas o estanques profundos (DOF, 2009).

Directa: consiste en la introducción directa del agua al acuífero por medio de pozos cuya sección abierta lo penetran parcial o totalmente. Cada tipo o método es aplicable a una combinación de factores físicos, hidrogeológicos, ambientales y económicos, que deben ser evaluados en un proyecto específico (DOF, 2009).

2.1.2 Criterios de diseño para pozos de infiltración

Tipos de camisas

Los pozos diseñados para el almacenaje y recuperación de agua en acuíferos generan una cantidad de óxido mayor debido al aumento de la superficie que se humedece por los ciclos de recarga y recuperación. Esto ocurre principalmente en zonas que almacenan agua salobre, como acuíferos costeros (NOM-014-CONAGUA-2003).

Diámetro del pozo

El diámetro del pozo debería ser similar a un pozo de bombeo común, excepto cuando uno o más tubos de inyección son usados para la recarga. En estos casos, es aconsejable tener un pequeño espacio extra al interior de la camisa para permitir la fácil entrada o salida de las bombas, tubos de inyección, líneas de aire y cables de electricidad para las bombas sumergibles. Este espacio extra es útil también para bajar instrumentos geofísicos de medición bajo la bomba, permitiendo evaluar



cambios en la distribución del flujo debido a diferentes estados de colmatación dentro del pozo durante la recarga (DOF, 2009).

Diseño de cribas

En los últimos años se ha generado controversia respecto de si las cribas y la capa de grava diseñada para los pozos (ASR) en un acuífero no consolidado debieran ser diferentes en comparación a un pozo de bombeo normal. Una solución a esto podría ser la elaboración de cribas de un largo mayor de tal forma que, durante el bombeo o redesarrollo, la capa de grava se limpie de partículas de sólidos más fácilmente. Aunque lo anterior es una buena idea, la evidencia sustenta que la mejor solución es diseñar las cribas idénticas a los pozos de bombeo comunes para no incrementar los movimientos en el paquete de grava alrededor de ellas (DOF, 2009).

2.1.3 Proceso de colmatación

La colmatación en los sistemas de recarga artificial es un problema normalmente encontrado. Este proceso consta en reducir el área de infiltración. Se disminuye por los procesos químicos, físicos y biológicos, resultando una disminución en la efectividad de la recarga. Existen cinco principales procesos de colmatación: físico, biológico, químico, por generación aire/gas y por compactación. En los pozos de inyección la colmatación se muestra como un incremento de la resistencia al flujo. Las principales zonas donde ocurre esto es en el filtro de grava, y en la zona del suelo subyacente al pozo (DOF, 2009).

2.2 Requisitos para la recarga

2.2.1 Localización de la obra

El estudio del proyecto debe llevar un mapa geo-referenciado con la ubicación geográfica de la o de las obras de recarga, se deben incluir las fuentes de contaminación de agua subterránea actuales o potenciales del área de estudio. La ubicación de las obras y fuentes se debe determinar con geo-posicionador o con



otro método equivalente de igual o mayor precisión a la obtenida con éste, acorde a la escala del estudio (Charles, 2002).

2.2.2 Fuente de agua de recarga

Las características de la fuente de agua residual que se utilizan para los sistemas de recarga artificial deben estar identificadas en términos de su origen, régimen de descarga, tipo y nivel de tratamiento, volumen de agua disponible, uso o destino actual. Las características físico-químicas y microbiológicas del agua de recarga deben ser analizadas y aprobadas para los parámetros que establece la Mod. NOM-127-SSA1-1994 para el agua de consumo humano (NOM-014-CONAGUA-2003).

2.2.3 Hidrología de la zona

La hidrología de la zona de estudio debe contener mapas de configuración y profundidad de niveles piezométricos del acuífero que subyace, perfiles estratigráficos obtenidos mediante perforaciones o sondeos geofísicos, características hidráulicas del acuífero, características fisicoquímicas y biológicas del agua nativa, captaciones de agua subterránea existente o por construir, fuentes de contaminación aledañas al área de recarga y determinación de la posible conexión hidráulica de los acuíferos (Charles, 2002).

2.2.4 Permiso de infiltración

Se debe tener un permiso dispuesto por los artículos 47 y 91 de la Ley de Aguas Nacionales. No se permite la construcción de sistemas de recarga artificial si el proyecto se propone en terrenos donde las características físico-químicas del suelo o del agua subterránea hayan sido degradadas a causa de un evento previo de contaminación, aún cuando se hayan aplicado medidas de saneamiento y en terrenos que, por carecer de una cobertura edáfica y por predominar en el subsuelo rocas cársticas, fracturadas, o clásticos de grano grueso, no tengan capacidad para eliminar o atenuar los contaminantes presentes en el agua de recarga. Esta condición aplica únicamente a SRA de tipo Superficial y Subsuperficial (NOM-014-CONAGUA-2003).



2.2.5 Monitoreo

A todos estos criterios que existen en los proyectos de recarga artificial, le agregamos los problemas ocasionados por infiltración de agua de mala calidad y los desafíos que conlleva infiltrar agua de buena calidad, entre estos tenemos la infiltración por agua con un tratamiento no adecuado, infiltración debido a fallas geológicas no conocidas, limpieza en las áreas de infiltración, entre otros. Por ello es importante mantener un monitoreo constante de la obra de recarga (NOM-014-CONAGUA-2003).

2.3 Calidad de agua

De acuerdo con la NOM-014-CONAGUA-2003 la calidad para las aguas utilizadas en recarga artificial depende del origen del agua que será infiltrada. Si el agua que se infiltrará proviene de aguas naturales dicha norma establece que el agua meteórica y la superficial que no han sido expuestas a potenciales fuentes de contaminación pueden ser usadas en un sistema de recarga artificial sin restricciones en cuanto a su calidad. Tratándose de aguas residuales, se podrá infiltrar agua que tenga una calidad que no deteriore el agua subterránea nativa. Para asegurar la calidad de agua en un sistema de recarga artificial con agua residual se requiere el monitoreo de los parámetros que así lo garanticen.

El agua residual tratada que es utilizada en la recarga de acuíferos debe cumplir con ciertas especificaciones dependiendo del contaminante y del sistema de recarga como se muestra en la Tabla 1.



Tabla 1.- Especificaciones del agua residual utilizada en la recarga de acuíferos

Tipo de contaminante	Sistema Subsuperficial	Sistema directo
Microorganismos Patógenos	Remoción o inactivación de microorganismos entero patógenos	Remoción o inactivación total de microorganismos entero patógenos
Contaminantes Regulados por Norma	Norma Límites permisibles Mod. NOM-127-SSA1-1994	Norma Límites permisibles Mod. NOM-127-SSA11994
Contaminantes no Regulados por Norma	DBO5 \leq 30 mg/l, COT = 16 mg/l	COT \leq 1 mg/l

De acuerdo con la NOM-014-CONAGUA-2003, cuando el sistema de recarga artificial se encuentre a menos de 1.0 km de captaciones de suministros de agua para uso público-urbano o doméstico se deben cumplir, además de los requisitos ya mencionados en la Tabla 1, los siguientes:

- a) Realizar un proyecto “piloto” de recarga in situ, cuya operación tenga la duración suficiente para determinar: la calidad del agua resultante de la mezcla del agua de recarga con el agua subterránea nativa, la interacción del agua de recarga con el subsuelo, la respuesta de los niveles de agua a la recarga y las variaciones de la tasa de infiltración en el tiempo;
- b) Efectuar un análisis hidrogeoquímico, basado en un modelo numérico, de las probables reacciones fisicoquímicas del agua de recarga con el agua subterránea nativa y con los materiales que conforman el acuífero y la zona no saturada. El análisis debe concluir: si el agua de recarga es compatible con el agua subterránea nativa o si existen condiciones para generar alguna reacción fisicoquímica que altere la calidad del agua nativa o las propiedades hidráulicas del acuífero



- c) Aplicar un modelo numérico de flujo y transporte de solutos, para simular el impacto del sistema de recarga artificial en la calidad del agua nativa en las captaciones subterráneas y en los niveles del acuífero a recargar (DOF, 2009).
- d) Cumplir con los límites máximos permisibles en la calidad del agua de recarga que determine “La Comisión”, para aquellos parámetros no regulados por la NOM-127-SSA1-1994, cuya presencia se suponga atendiendo al origen del agua residual tratada.
- e) Realizar, en su caso, los estudios toxicológicos que determine “La Comisión” en el agua de recarga (DOF, 2009).

2.4 Tratamiento de agua

El tratamiento de las aguas residuales consiste en la aplicación de procesos u operaciones unitarias que permitan la remoción de los contaminantes y la mineralización de sus componentes con el fin de convertirlos en compuestos inocuos o menos dañinos para el ambiente.

El tratamiento de aguas residuales puede realizarse en cuatro etapas: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y el tratamiento terciario (Peña, Ducci, & Zamora, 2013).

2.4.1 Tratamiento primario

El tratamiento primario consiste en un conjunto de procesos físico-químicos que se aplican para reducir el contenido de partículas en suspensión del agua. Estos sólidos en suspensión pueden ser sedimentables o flotantes. Los primeros son capaces de llegar al fondo tras un periodo corto de tiempo mientras que los segundos están formadas por partículas muy pequeñas, integradas en el agua, por lo que no son capaces de flotar ni sedimentar y para eliminarlas se requiere de otras técnicas (Peña, Ducci, & Zamora, 2013).

Algunos de los métodos primarios que se utilizan en el tratamiento de agua son:

- Sedimentación: proceso por el que las partículas caen al fondo gracias a la acción de la gravedad. Pueden eliminarse hasta un 40% de los sólidos que



contienen las aguas. Dicho proceso ocurre en unos tanques denominados decantadores.

- Flotación: consiste en la retirada de espumas, aceites y grasas, debido a la diferencia de densidades que presentan en la capa superficial del agua. De la misma manera pueden eliminarse partículas con baja densidad, mediante la inyección de burbujas de aire facilitando su flotación. Con esta técnica podría eliminarse un 75% de las partículas suspendidas.
- Neutralización: consiste en la normalización del pH, es decir, ajustarlo a un valor en el rango de 6-8,5, que es típicamente el valor del agua. En el caso de aguas residuales ácidas, como las que contienen metales pesados se añaden sustancias alcalinas para subir el pH del agua. Por el contrario, en aguas residuales alcalinas suele introducirse CO_2 para que el pH del agua disminuya hasta los valores normales (Peña, Ducci, & Zamora, 2013).

2.4.2 Tratamiento secundario

El tratamiento secundario consiste en un conjunto de procesos biológicos que pretenden eliminar la materia orgánica que hay en las aguas residuales. Estos procesos se basan en la actividad de algunas bacterias y microorganismos que transforman la materia orgánica en biomasa celular, energía, gases y agua. Este tratamiento tiene una eficacia del 90%.

En estos sistemas se encuentran los procesos aerobios y anaerobios. Los primeros se trabajan mediante oxigenación, de esta manera es importante agregarlo en los tanques donde se encuentra el agua residual. Durante dicha etapa empieza el proceso de la disminución de materia orgánica, la cual suelta CO_2 y agua, también, en menor medida, la eliminación de materiales de nitratos. El amonio, proveniente del nitrógeno es tóxico, esta transformación de amonio en nitrato se conoce nitrificación. Aunque el nitrato ya no es tóxico es una forma semejante del nitrógeno y por ello, puede ocasionar una proliferación de algas y el crecimiento de nutrientes en las aguas del medio receptor, por lo que durante la desnitrificación éste se convierte en nitrógeno y es liberado a la atmósfera. De lo contrario, los sistemas anaerobios se realizan sin oxígeno. Durante estos procesos ocurren reacciones



fermentativas en las que la materia orgánica se convierte en energía, metano y dióxido de carbono (Alexander & Ricardo, 2002).

Algunos de los métodos secundarios que se utilizan en el tratamiento de agua son:

- Lodos activados: se trata de un proceso aerobio que consiste en producir flóculos o grumos de microorganismos a partir de la materia orgánica del agua residual, para lo cual se requiere introducir constantemente oxígeno para que se produzcan las reacciones.
- Lechos bacterianos: proceso aeróbico. Se trata de unos soportes donde se desarrollan los microorganismos que crecen a expensas del agua residual que se aplica lentamente para mantener las condiciones aeróbicas.
- Filtros verdes: se trata de cultivos que se riegan con aguas residuales ya que estos tienen la capacidad de absorber sus compuestos.
- Digestión anaeróbica: se trata de un proceso anaeróbico que se realiza en tanques completamente cerrados. Principalmente se desarrollan bacterias que producen ácidos y metano durante la degradación de la materia orgánica (Alexander & Ricardo, 2002).

2.4.3 Tratamiento terciario

Los tratamientos terciarios consisten en la degradación de los componentes patógenos, sobre todo bacterias coloidales, y de los nutrientes. El tratamiento terciario no siempre se realiza y usualmente se emplea cuando el agua se va a utilizar en actividades que necesite agua potable, en jardines, espacios públicos para que no representen un daño irremediable en la salud humana, de misma forma en los cauces de espacios protegidos que puedan contaminar agua de alta calidad necesaria para el consumo humano. Los procesos de tratamiento terciario de aguas residuales usualmente utilizados son:

- Radiación ultravioleta: Para que este proceso sea utilizable las aguas deben ser claras y tener poco material disuelto, de esta manera la luz podrá alcanzar a todas las partículas. Dicho sistema elimina la producción de los microorganismos y el desarrollo de su capacidad de infección en el líquido.



Es capaz de eliminar alrededor de un 99% de los microorganismos encontrados en el agua.

- Intercambio iónico: Técnica utilizada para retirar del agua sales en bajas concentraciones, para lo cual se emplean resinas que son capaces de retener iones temporalmente.
- Ósmosis inversa: Este proceso consta de la eliminación de sales al moverse el agua desde una solución concentrada a una más diluida por medio de una membrana creando una fuerza alterna.
- Filtración: Consta en la degradación de partículas suspendidas o coloidales que no hayan sido eliminadas en los tratamientos anteriores. Mediante el filtrado utilizando materiales de arenas y gravas.
- Cloración: Consta en la degradación de los microorganismos utilizando compuestos clorados que ayudan a la eliminación del amonio (Peña, Ducci, & Zamora, 2013).

2.5 Energía solar

La energía solar es la fuente de energía más antigua utilizada. La primera aplicación práctica conocida fue en el secado para la conservación de alimentos (Narayan, Mostafa, Edward, John, & Syed, 2011).

Durante los últimos años se ha demostrado que la quema de combustibles fósiles es una de las causas que contribuyen al cambio climático en la Tierra. La reducción en el uso de combustibles fósiles implica la utilización de energías alternativas. Éstas se refieren a las que, a diferencia de las energías convencionales, usan recursos renovables como fuente de generación. Estas formas de energía se producen de manera continua y tienen su origen en los procesos ambientales y atmosféricos naturales: el viento, el sol, los cursos de agua, la descomposición de la materia orgánica, el movimiento de las olas en la superficie del mar y océanos y el calor interior de la tierra (Kalogirou, 2014).

Una de las energías alternativas con mayor utilidad es la energía solar. Es la causa de las corrientes de aire, de la evaporación de las aguas superficiales, de la



formación de nubes, de las lluvias y, por consiguiente, el origen de otras formas de energía renovable, como el viento, las olas o la biomasa. Su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de las plantas, de los animales y, en definitiva, para que pueda haber vida sobre la Tierra. El Sol es, por tanto, la principal fuente de energía para todos los procesos que tienen lugar en nuestro planeta (Kalogirou, 2014).

Radiación solar

La radiación solar es una de las formas en que la energía tiene para moverse de un lugar a otro. Para Sol, los rayos solares se trasladan a través del espacio con forma de ondas electromagnéticas de energía. Dicho fenómeno se conoce como radiación solar, el cual es responsable de que nuestro planeta acepte una cantidad de energía continua aproximadamente 1.367 W/m^2 . (Domínguez, 2006).

Esta cantidad es nombrada como constante solar y al cabo de 365 días es equivalente a 20 veces la energía contenida en todas las reservas de combustibles fósiles en el mundo. No toda la radiación solar que llega a la Tierra supera las capas altas de la atmósfera. Esto se debe a los procesos que tienen los rayos solares cuando entran en contacto con los diferentes gases que se encuentran en la atmósfera terrestre, una tercera parte de esta energía solar que llega a la Tierra se devuelve al espacio exterior, las dos terceras partes restantes son absorbidas por la Tierra. Este hecho se debe a que las porciones de vapor de agua, metano, ozono y dióxido de carbono que actúan como una barrera protectora (Figura 1).

A la pérdida de energía solar que se produce en las primeras capas de la atmósfera terrestre hay que añadirle otros procesos que influyen en la cantidad de radiación solar que llega hasta un punto determinado del planeta. La intensidad de radiación no será igual cuando los rayos solares estén perpendiculares a la superficie irradiada que cuando el ángulo de incidencia sea más oblicuo, tal y como ocurre en los polos. Pero para establecer, con exactitud, la cantidad de energía que se puede aprovechar en un sitio concreto, también habrá que tener en cuenta otros aspectos como la hora del día, la estación del año y muy especialmente las condiciones atmosféricas. En los días nublados disminuirá considerablemente la intensidad de



la radiación y por lo tanto el aporte energético que pueda recibir una instalación de energía solar térmica. Aunque la relación entre las variaciones en la nubosidad y la radiación solar es compleja, probablemente este factor es el más importante a la hora de poder calcular la energía que llega a un punto concreto de la superficie terrestre (López, 2006).

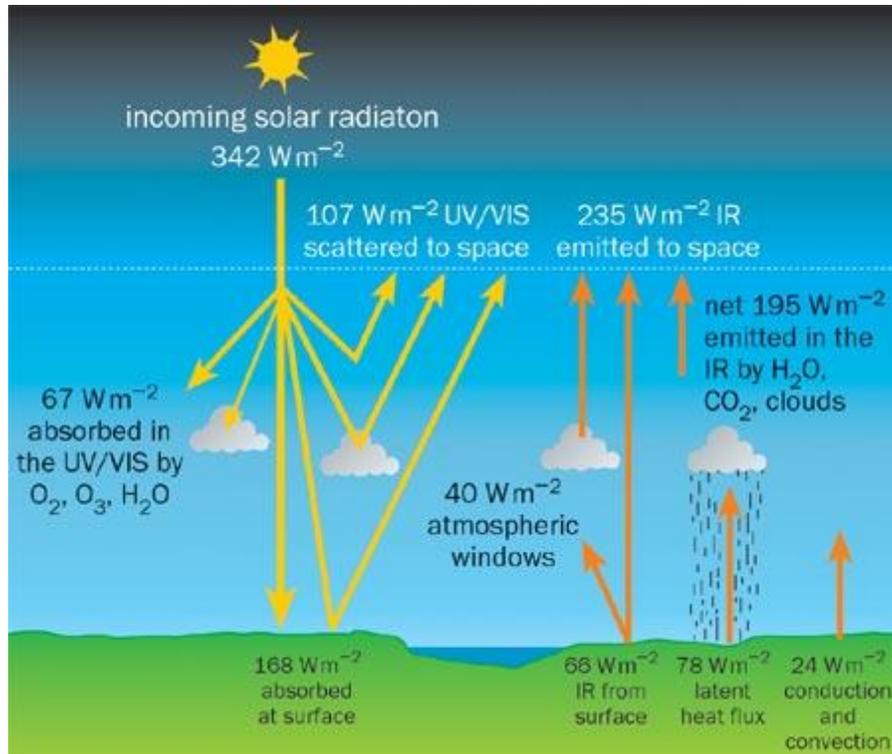


Figura 1.- Radiación solar (López, 2006).

2.6 Destilación solar

La *desalación* es un término que se refiere a múltiples procedimientos para purificar el agua, eliminando la salinidad, y otros contaminantes para hacerla potable. Debido a la creciente demanda de nuevas fuentes de energía y consideraciones ambientales, se requieren fuentes sostenibles de energía renovable. El sistema de destilación solar es una de las soluciones más adecuadas para purificar el agua debido al bajo costo de instalación y mantenimiento de las plantas. Además, se



producen pocos contaminantes, por lo que puede considerarse respetuoso con el medio ambiente. Los sistemas de destilación solar se basan en un principio de funcionamiento simple, ya que el agua recibe energía radiante del sol que la convierte en vapor, el cual se condensa generando el agua destilada, con mínima salinidad (Kumar, 2020).

Un destilador de agua captura el proceso de evaporación y condensación en una cámara, concentrando las impurezas como materiales inorgánicos, otros químicos en una fase de donde son removibles. Incluso puede purificar el agua de mar. La destilación es una de las primeras formas de tratamiento de agua de la humanidad y sigue siendo una solución de tratamiento popular en todo el mundo en la actualidad. En la antigüedad, los griegos usaban este proceso en sus barcos para convertir el agua de mar en agua potable y también para tratar el agua en otras áreas contaminadas por contaminantes naturales y no naturales. La energía solar que tiene la ventaja de la autosuficiencia es la más adecuada para producir agua pura ya que no necesita otras fuentes de energía costosas, como combustible o electricidad (Kumar, 2020).

Entre los diversos tipos de destiladores solares, el sistema de destilación solar pasivo único es el más simple y menos costoso. Este sistema es completo y no requiere infraestructura adicional excepto el agua cruda necesaria y suficiente luz solar (Figura 2).

Se han construido varios diseños de destiladores solares económicos con alta productividad cambiando la geometría del depósito, reduciendo las pérdidas de calor, aumentando la recolección de calor por el concentrador y los reflectores, precalentando el agua de entrada, manteniendo un índice de flujo óptimo, logrando una condensación gota a gota reduciendo la temperatura de la superficie del condensador uso de varios materiales de almacenamiento de calor superficie absorbente texturizado, uso de condensadores externos, etc. (Kumar, 2020).

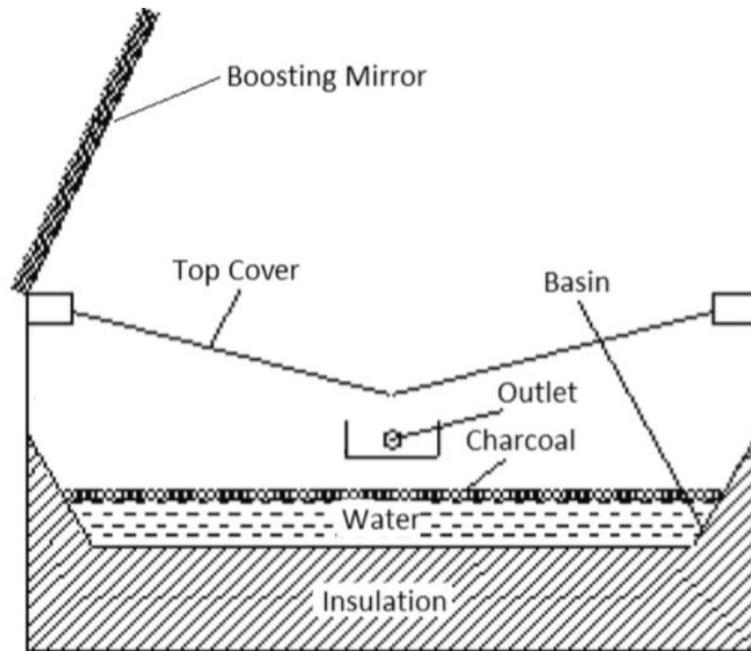


Figura 2.- Destilador solar convencional de dos aguas (Kumar, 2020).

2.6.1 Factores que afectan la productividad de los destiladores solares

Los diversos factores que afectan la productividad de la energía solar son: la intensidad solar, la velocidad del viento, la temperatura ambiente, la diferencia de temperatura de agua-vidrio, el área de la superficie libre del agua, el área de la placa absorbente, la temperatura del agua de entrada, el ángulo de vidrio y la profundidad de agua. La intensidad solar, la velocidad del viento y la temperatura ambiente no se pueden controlar ya que son parámetros meteorológicos. Mientras que los parámetros restantes, tales como la superficie libre del agua, el área de la placa absorbente, la temperatura del agua de entrada, el ángulo de vidrio y la profundidad del agua se pueden variar para mejorar la productividad del sistema. Al considerar los diversos factores mencionados se han propuesto varias modificaciones para mejorar la productividad de los destiladores.

Área de superficie libre del agua: la tasa de evaporación del agua en el destilador solar sigue siendo directamente proporcional al área de exposición del agua. Por lo



tanto, la productividad de la energía solar aún aumenta con el área de superficie libre del agua en el destilador (Arunkumar & Vinothkumar, 2012).

Diferencia de temperatura del vidrio de agua: el rendimiento de un destilador solar depende principalmente de la diferencia entre las temperaturas de cubierta de agua y vidrio, la cual actúa como una fuerza impulsora del proceso de destilación.

Área de placa de absorción: la productividad de la energía solar aumenta con el incremento de área de absorción. Las escaleras se integran en los destiladores solares para aumentar considerablemente el área de la placa de absorción.

Temperatura de entrada del agua: la tasa de evaporación del agua salina aumenta con la temperatura del agua. Colectores de placas planas, tanque de almacenamiento, mini estanque solar, entorno de usos múltiples, invernadero y entorno de múltiples salas de uso, tubos de calor, están integrados con la energía solar a aumentar la temperatura.

Ángulo de vidrio: Se ha demostrado que el rendimiento anual de la energía solar es incrementado cuando la inclinación de la cubierta de vidrio de condensación es igual a la latitud del lugar. El ángulo de inclinación de la cubierta debe ser suficiente para hacer viajar el agua condensada en la cubierta de vidrio a los canales de recolección.

Profundidad del agua: El rendimiento se incrementa cuando la profundidad del agua es menor. Mientras se mantiene una profundidad mínima en el destilador puede generarse una mancha seca. Por lo tanto, el agua dentro del destilador debe tener una profundidad pequeña para aumentar la producción, pero no demasiado. Para esto se han desarrollado los destiladores solares escalonados (Arunkumar & Vinothkumar, 2012).

2.6.2 Destilador solar escalonado

El destilador solar escalonado, en escalera o en cascada, tiene el mismo principio que el destilador solar simple. Este tipo de destiladores fueron modificados con el paso del tiempo con el propósito de incrementar la producción de agua y mejorar la calidad del agua salobre de un destilador solar convencional, el cual consiste en un solo recipiente, donde el agua es depositada y extraída diariamente. Se han



realizado experimentos para incrementar su productividad aumentando el área de superficie libre, la forma de recolección de agua y su volumen, dando lugar al destilador solar escalonado (Figura 3).

De acuerdo con Kumar (2020) las características de un destilador solar escalonado pueden variar dependiendo de su construcción, sin embargo, el destilador debe contar con lo siguiente:

Tanque almacenador de agua. El agua que se ha de tratar es almacenada en un tanque y alimentada con un caudal adecuado para ser distribuida en el área de los escalones.

Área de la cuenca. Es el área donde se encuentran los escalones, los cuales son cubiertos de acero inoxidable y deben estar pintados de negro para una mayor absorción de radiación solar. El tamaño tanto del área y las dimensiones de los escalones depende del tipo de trabajo que se quiera realizar y de las necesidades del proyecto.

Cubierta de vidrio. La cubierta de vidrio debe ser transparente y el espesor puede variar, es donde el agua se condensa. La inclinación de la cubierta debe ser semejante a la latitud del lugar de trabajo, para un mejor funcionamiento en el destilador (Kumar, 2020).

Canal de recolección. El agua condensada en la cubierta de vidrio viaja a un canal, el cual se recomienda que tenga una inclinación mayor a la cubierta de vidrio y sea de un material aislante al calor, para que el agua no vuelva a evaporarse y pueda continuar su camino a el recipiente donde es recolectada y extraída (Kumar, 2020).

Recolector de residuo. En la parte inferior de la cuenca debe existir una salida del agua concentrada que no fue evaporada en el camino escalonado. De esta manera se eficientiza el tratamiento y la limpieza del destilador (Kumar, 2020).

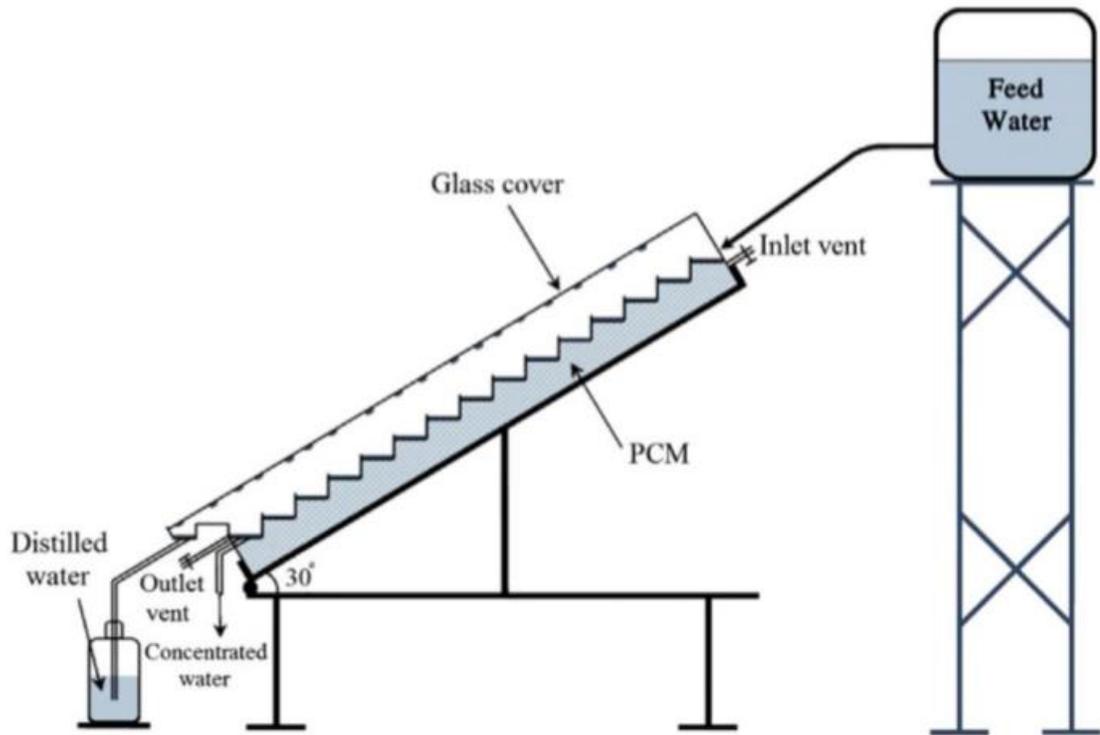


Figura 3.- Destilador solar escalonado o en cascada (Arunkumar & Vinothkumar, 2012).



Capítulo 3. Materiales y métodos

En este capítulo se describen los materiales utilizados, el procedimiento de construcción del prototipo de destilación y la metodología que se siguió durante las etapas de estabilización (pruebas con agua potable) y la etapa experimental de destilación del agua residual tratada.

3.1 Procedimiento de construcción y equipamiento del destilador

3.1.1 Mesa metálica

El destilador fue construido en cinco secciones. La primera fue la mesa para soporte, la cual se construyó en un taller de herrería con materiales reciclables. Se utilizaron formas cuadrangulares de 2 pulgadas para la base de la mesa y un letrero de señalización vial para la parte superior de la misma, la cual mide 80 cm por 80 cm, por 100 cm de alto (Ver figura 4).



Figura 4.- Mesa metálica de apoyo para el destilador.



3.1.2 Cubierta de vidrio

La cubierta de vidrio se construyó en un taller especializado de vidriería. Consta de dos piezas; la primera, la caja de vidrio tiene una base cuadrada de 73 cm por lado, una altura en la parte posterior de 50 cm y una altura en la parte frontal de 25 cm. La parte superior de la caja cuenta sobre el perímetro con escuadras de aluminio para sentar la tapa de vidrio, la cual tiene un ancho de 72 cm y un largo de 74.4 cm. Cuenta con dos agarraderas de aluminio para poder retirar y colocar la tapa con facilidad. El vidrio de la caja tiene un espesor de 3 mm y el de la tapa es de 6 mm. (Ver figura 5).



Figura 5.-Caja y tapa de vidrio que forman la estructura exterior del destilador.



A la tapa de vidrio se agregaron empaques negros para sellado, así como cuatro placas de plástico al frente, dos en los costados y dos en la parte posterior, esto para abrazar con alambre galvanizado la tapa y sellarla completamente (Ver figura 6).



Figura 6.- Pinza para sellar la tapa con la caja de vidrio.

3.1.3 Escalera

La escalera consta de tres partes principales: la estructura escalonada de madera que aporta un material aislante al calor, la cubierta de acero inoxidable y las láminas de acero inoxidable en la parte frontal de cada escalón. El ancho de la escalera es de 71 cm, el largo de 54 cm y la altura de 27 cm, dejando cada escalón con un ancho de 9 cm por 70 cm de largo y una altura de 4.5 cm. La lámina de acero se instaló sobre los escalones para contener la mínima cantidad necesaria de agua en cada uno de ellos, con dimensiones de 71 cm de largo y 2.5 cm de alto. La escalera fue pintada de negro mate para tener una mayor absorción de energía solar (Ver figuras 7 y 8).



Figura 7.-Escalera de madera.



Figura 8.- Escalera ya cubierta por acero inoxidable.



3.1.4 Depósito de agua

El depósito de agua que funciona para alimentar el destilador constantemente durante el día es una cubeta de 20 litros con su tapa. Este depósito cuenta con una llave de jardín en la parte inferior para regular el flujo, seguido de una manguera de media pulgada que conecta con el destilador (Ver figura 9).



Figura 9.- Depósito de agua tratada con su vía de entrada al destilador solar.

3.1.5 Recolector de agua

El destilador cuenta con dos salidas en su parte frontal. La primera se encuentra en la parte central superior, para recolectar el agua destilada en un envase de 2 litros; está en medio del canal recolector. La segunda salida se ubica en la parte central inferior; sirve para recolectar el agua con las sales concentradas, lo que permite dar un mantenimiento más eficiente al destilador. (Figura 10).



Figura 10.- Recolector de agua potable.



3.2 Estación climatológica

Se instaló una estación climatológica en el mismo punto que el destilador, para obtener de esta manera datos más cercanos al punto de trabajo. La marca de la estación climatológica instalada es Vantage Pro2 de Davis, con sensor de índice UV y radiación solar, veleta, cono de captación pluvial y anemómetro. Los parámetros climatológicos medidos fueron: temperatura del exterior, radiación solar, velocidad y dirección del viento, precipitación y humedad relativa (Ver figura 11).



Figura 11.- Estación climatológica en el lugar de trabajo.

El destilador cuenta con un termómetro que mide la temperatura del vapor interior. El termómetro fue sellado apropiadamente con silicón (ver figura 12). De esta



manera se pudo comparar el funcionamiento del destilador con las condiciones climatológicas en el exterior.



Figura 12.- Termómetro para medir la temperatura interior del destilador.

3.3 Ubicación del prototipo

El trabajo se realizó en Chihuahua, Chihuahua, México. La planta de tratamiento de donde se obtuvo el agua a destilar (Planta Sur) se encuentra al sureste de la ciudad. El destilador fue ubicado en la azotea de una casa habitación localizada al norte de la ciudad, se le permitía estar libre de objetos u obstrucciones que le impidieran obtener la mayor radiación solar posible (Ver figura 12).



Figura 13.- Ubicación del lugar de trabajo.

3.4 Primera etapa experimental

Al construir el destilador por partes el siguiente paso fue armarlo, e instalarlo en la ubicación ya mencionada. El destilador se colocó en la mesa metálica sobre un tapete negro de hule, para no dañar la caja de vidrio; una vez colocada ésta sobre la mesa se le añadió la escalera. Antes de iniciar con las pruebas se aseguró que el destilador estuviera sellado, por lo que se agregó silicón entre la escalera y la caja de vidrio, así como en las aristas de la misma para evitar fugas. También se agregó silicón en las escuadras de aluminio y en los empaques de la tapa de vidrio. Inicialmente se presentaron algunos inconvenientes con la tapa de la caja, por lo que se hicieron varios intentos con diferentes espesores del vidrio (3 mm y 6 mm).



Para lograr un mejor ajuste se agregaron cuatro bases de plástico al frente en la caja de vidrio y cuatro en la tapa; de esta forma un alambre galvanizado pasó entre las bases y se ajustó para hacer presión en la tapa de vidrio; se procedió a hacer lo mismo en los costados y en la parte trasera.

3.4.1 Funcionamiento del destilador con agua potable (AP)

Al revisar y constatar que el destilador no tuviera fugas de vapor ni de agua se procedió a hacer pruebas con agua potable (AP). El agua se tomaba directa del tinaco casero y se agregaba al depósito de alimentación de 20 litros.

El primer paso consistió en encontrar el caudal óptimo con el que debía entrar el agua al destilador, ya que un caudal muy grande ocasionaba derrames en los escalones y salía por la manguera del residuo, mientras que un caudal pequeño ocasionaba la evaporación súbita del agua sin alcanzar a llenar los escalones. A primera instancia los escalones tenían una apertura de un lado, en lado contrarios por escalón, para que el agua tuviera su curso, de esta forma los escalones nunca se llenaban completamente de agua y había pérdidas de vapor. Se les agregó una lámina de acero galvanizado para cerrar estas aperturas, de esta forma, el agua tenía que llenar el escalón y así continuar al siguiente, asegurando la cantidad necesaria para la mayor evaporación de agua posible.

Al tener el flujo necesario y la cantidad de agua requerida, lo siguiente a revisar fue el canal recolector de agua potable. Se colocaron dos canales recolectores distintos; el primero fue un canal que cubrió los costados y el frente del destilador, de acero galvanizado con un espesor de 10 cm. Este canal no recolectó agua, al estar el canal frontal unido a los laterales, el frontal no podía tener una pendiente necesaria y el ancho del canal resultó ser angosto. El segundo canal, también de acero galvanizado, sólo cubría la parte frontal, pero tenía un espesor de 20 cm y de esta forma podía tener una pendiente de cada lado hacia el centro, donde se encontraba la salida del agua (Ver figura 13).



Figura 14.- Destilador en funcionamiento

Durante esta etapa de pruebas con agua potable, misma que duró del 6 al 25 de abril de 2022, se midieron en el agua de la entrada y la salida del destilador los parámetros de control de la operación: pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos.



3.5 Segunda etapa

3.5.1 Periodo experimental con agua tratada (AT)

Después de estabilizar el destilador con agua potable se realizaron pruebas con el efluente de la Planta de Tratamiento Sur Chihuahua, contando con permiso del personal técnico de la Planta para tener acceso a la misma y poder tomar la muestra del efluente (AT). Ésta se colectó en garrafones de agua purificada de 20 litros, se refrigeró, y se procedió a colocar en el depósito de entrada al destilador.

Durante este periodo de pruebas con agua del efluente se les midieron tanto al agua de la entrada como a la salida los parámetros fisicoquímicos de temperatura, pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos durante el período comprendido entre el 9 y el 24 de mayo de 2022.

Finalmente se colectó una muestra compuesta de la entrada (efluente de la Planta Sur) y la salida del destilador para realizar el análisis de los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad eléctrica (CE), color, sulfatos (SO_4^{2-}), cloruros (Cl), nitratos (NO_3), fluoruros (F^-), dureza total (DT), dureza cálcica (DCa), sodio (Na), hierro (Fe), demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y demanda química de oxígeno (DQO).



Capítulo 4. Resultados y discusión

4.1 Análisis de entrada y salida del destilador. Primera etapa (AP)

Al revisar los requerimientos necesarios para recolectar la mayor cantidad que se pudiese destilar, en este caso fueron 500 ml diarios, se procedió a analizar los parámetros de temperatura, pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos del agua que entraba al destilador y del agua que salía por la canaleta de recolección. Se tomaron dos grupos de datos correspondientes a periodos diferentes: del 6 al 13 de abril y del 18 al 24 de abril, cuyos resultados se muestran en las tablas 2 y 3. De la estación meteorológica se recolectaron datos a partir del 18 de abril, de esta forma fue posible relacionar el clima con el segundo periodo de toma de datos del agua destilada (Ver tabla 4).

Tabla 2.- Primer período de recolección de datos, con agua potable de entrada.

Fecha	Entrada				Salida				Temperatura Max. Interior (°C)
	pH	CE (μS/cm)	SDT (mg/L)	Temperatura (°C)	pH	CE (μS/cm)	SDT (mg/L)	Temperatura (°C)	
06/04/2022	7.93	328.00	237.00	23.38	7.50	32.00	22.00	18.20	65
07/04/2022	7.99	334.00	241.00	24.40	7.61	34.00	25.00	18.23	65
08/04/2022	7.87	336.00	247.00	23.61	7.56	35.00	26.00	18.41	65
09/04/2022	7.88	312.00	221.00	23.57	7.48	29.00	20.00	17.98	64
10/04/2022	7.89	345.00	253.00	23.53	7.52	36.00	27.00	19.20	64
11/04/2022	7.81	317.00	230.00	24.12	7.55	31.00	31.00	18.60	65
12/04/2022	7.84	298.00	207.00	22.15	7.74	28.00	21.00	18.31	65
13/04/2022	7.90	336.00	246.00	22.45	7.67	33.00	25.00	17.84	65



Tabla 3.- Segundo periodo de recolección de datos, con agua potable de entrada.

Fecha	Entrada				Salida				Temperatura Max. Interior (°C)
	pH	CE (μS/cm)	SDT (mg/L)	Temperatura (°C)	pH	CE (μS/cm)	SDT (mg/L)	Temperatura (°C)	
18/04/2022	7.99	347.00	234.00	24.02	7.42	32.00	28.00	18.32	65
19/04/2022	7.87	356.00	253.00	23.60	7.12	33.00	24.00	18.43	65
20/04/2022	8.01	387.00	244.00	23.85	7.31	36.00	22.00	18.97	65
21/04/2022	7.96	343.00	276.00	23.81	7.15	34.00	30.00	19.43	65
22/04/2022	7.89	298.00	201.00	22.98	6.97	29.00	27.00	19.33	65
23/04/2022	7.82	323.00	223.00	24.03	7.03	37.00	29.00	20.10	66
24/04/2022	8.12	344.00	231.00	22.78	7.15	30.00	23.00	18.76	65
25/04/2022	7.86	321.00	229.00	22.89	7.21	31.00	25.00	18.06	65

Tabla 4.- Primeros datos obtenidos de la estación climatológica, correspondientes a los días de la segunda toma de parámetros.

Días	Temperatura del Aire (°C)	Humedad relativa (%)	Presión Atmosférica (hpa)	Radiación Solar (W/m ²)	Rapidez de viento (km/h)	Rapidez de ráfaga (km/h)
18/04/2022	30.45	11	858.9	788	10.08	19.98
19/04/2022	26.1	21	859.1	654.5	5.76	12.24
20/04/2022	26.1	10	859.1	548.5	8.64	14.94
21/04/2022	26.4	12	860.7	705	7.56	14.4
22/04/2022	28.05	10.5	860.1	459	13.68	24.48
23/04/2022	26.45	9	858.05	706	16.38	32.4
24/04/2022	23.85	12	856.7	709.5	9.72	19.08

En las tablas 2 y 3 puede observarse que las propiedades del agua destilada se mantuvieron estables, logrando un promedio del 90.5% de efectividad en la disminución de conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos. El vapor en el destilador tuvo una temperatura máxima de 68°C alcanzándola a las 12:00 pm y durando así 3 horas en promedio. En la tabla 4 los valores diarios son promedios de los 24 datos tomados por hora, donde la temperatura media osciló de los 26°C a 30°C y la radiación solar de los 600 a los 800 W/m². Comparando las tablas 3 y 4 analizamos que los días que más radiación solar había fueron los días con una temperatura más alta en el interior del destilador. Esto no afectó en la calidad del agua, pero sí en la producción de destilado (Ver Gráficos 1 y 2).

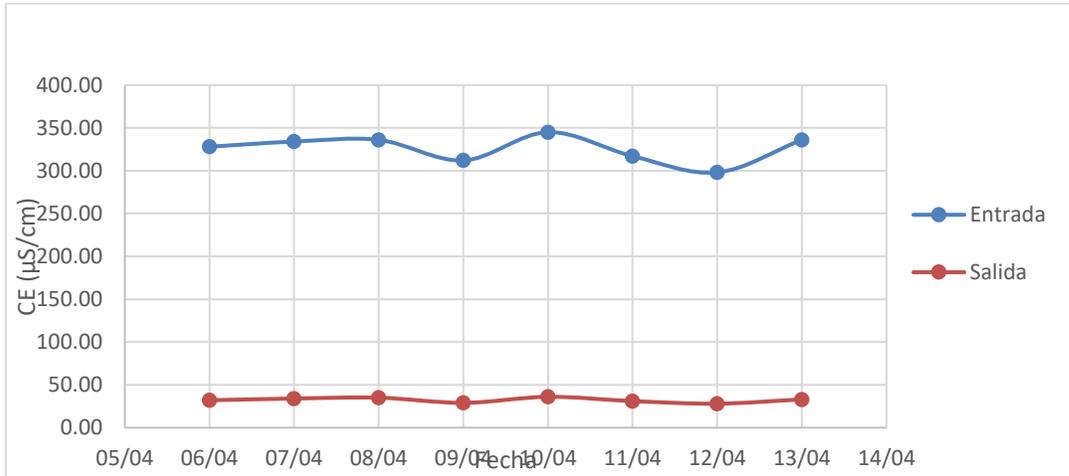


Gráfico 1.- Comparación de conductividad eléctrica de entrada y salida del destilador en la etapa de pruebas con agua potable.

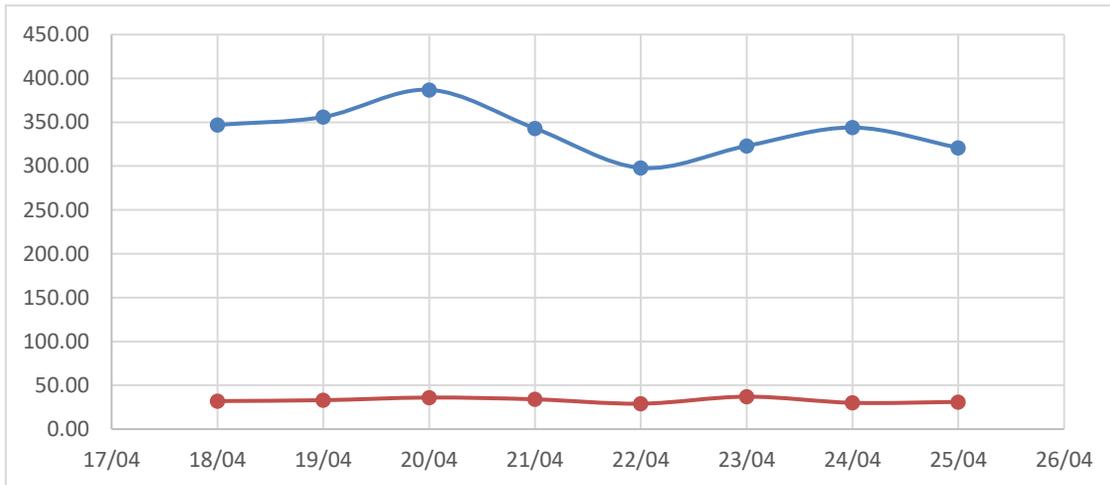


Gráfico 2.- Comparación de conductividad eléctrica de entrada y salida del destilador en el segundo período de pruebas con agua potable.

4.2 Segunda etapa

4.2.1 Período de prueba con agua tratada (AT)

Después de estabilizar la operación del destilador con agua potable se realizaron las pruebas con el efluente de la Planta de Tratamiento Sur Chihuahua. Se obtuvo permiso del personal técnico a cargo para tener acceso al efluente de la planta y poder tomar la muestra. Esta se colectó en un garrafón de 20 litros, se refrigeró, y se procedió a colocar en el depósito de entrada al destilador. Para el primer periodo



de pruebas con agua del efluente se utilizaron dos garrafones, cada uno de los cuales daba el volumen requerido para tres días. Con el fin de comprobar la eficiencia del destilador se midieron tanto a la entrada como la salida los parámetros físicoquímicos de temperatura, pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (Tabla 5, 6 y gráfico 3).

En la tabla 5 se aprecian los resultados de eficiencia del destilador para el primer período del estudio de destilación realizado con agua tratada (AT-1).

Tabla 5.- Resultados de primera prueba de destilación con agua tratada (AT-1)

Pruebas con Agua del Efluente. Etapa AT-1								
Fecha	Entrada				Salida			
	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	SDT (mg/L)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	SDT (mg/L)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
09/05/2022	8.210	1256.000	847.000	22.700	7.920	188.400	98.000	18.600
10/05/2022	8.130	1178.000	892.000	22.450	7.900	113.600	164.000	19.400
11/05/2022	8.240	1135.000	881.000	21.980	7.870	157.400	143.000	18.230
12/05/2022	7.970	1288.000	906.000	21.760	7.680	203.200	192.000	19.210
13/05/2022	8.450	1232.000	874.000	22.380	7.910	164.000	134.000	19.430
14/05/2022	8.150	1247.000	866.000	22.630	7.890	152.100	155.000	19.520

Tabla 6.- Parámetros climáticos durante la prueba con agua del Efluente. Etapa AT-1

Días	Temperatura del Aire ($^{\circ}\text{C}$)	Humedad relativa (%)	Presión Atmosférica (hpa)	Radiación Solar (W/m^2)	Rapidez de viento (km/h)	Rapidez de ráfaga (km/h)	Temperatura Max. Interior ($^{\circ}\text{C}$)
09/05/2022	30.75	7.00	856.70	694.00	12.96	25.20	66
10/05/2022	27.90	10.50	859.80	422.00	6.84	13.68	65
11/05/2022	29.15	15.50	860.40	532.00	10.44	18.72	64
12/05/2022	27.75	7.00	860.70	717.00	6.48	12.42	67
13/05/2022	29.70	10.00	861.20	619.00	6.12	10.44	65
14/05/2022	28.90	17.00	859.50	565.00	9.00	15.48	65

Las propiedades del agua colectada se mantuvieron estables logrando en promedio un 87% de eficiencia en la disminución de la conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos. En la tabla 6 observamos que la radiación solar más alta medida en este



proceso se detectó el 12 de mayo, sin afectar la calidad de agua, sin embargo, mejorando la producción del destilador a recolectar un 10% más de agua ese día. El gráfico 3 muestra un comportamiento constante en reducción de la conductividad eléctrica, generando de esta forma una confiabilidad en los resultados obtenidos.

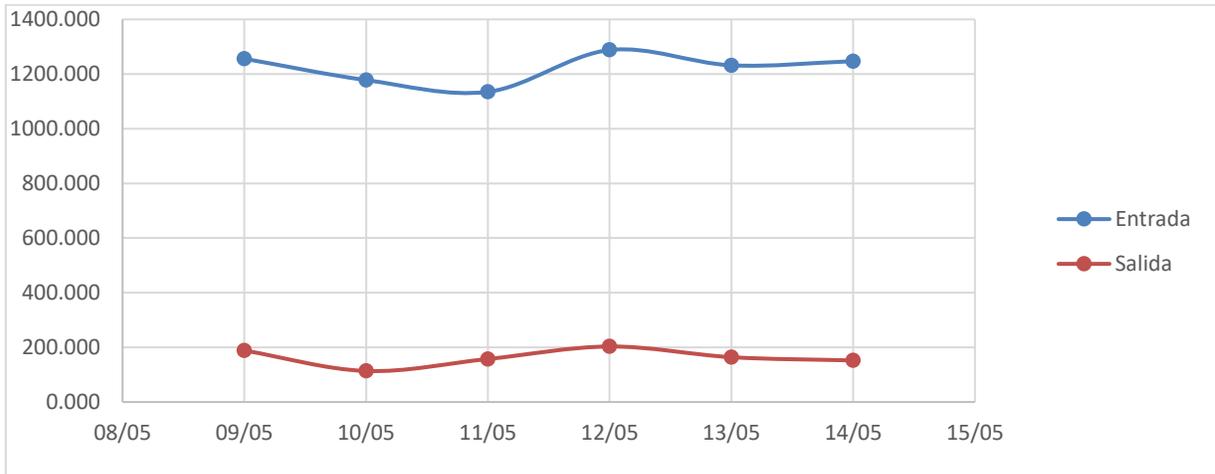


Gráfico 3.- Comparación de conductividad eléctrica de entrada y salida del destilador en la etapa de prueba con agua tratada.

Tabla 7.- Resultados de primera prueba de destilación con agua tratada (AT-2).

Pruebas con Agua del Efluente. Etapa AT-2								
Fecha	Entrada				Salida			
	pH	CE (μS/cm)	SDT (mg/L)	Temperatura (°C)	pH	CE (μS/cm)	SDT (mg/L)	Temperatura (°C)
19/05/2022	8.42	1407.00	975.00	24.30	7.94	312.00	250.00	20.20
20/05/2022	8.53	1385.00	920.00	23.60	8.00	286.00	232.00	19.80
21/05/2022	8.31	1376.00	915.00	23.20	7.86	278.00	225.00	20.30
22/05/2022	8.25	1320.00	886.00	22.80	7.76	281.00	228.00	19.60
23/05/2022	8.46	1290.00	868.00	22.72	7.78	240.00	189.00	18.90
24/05/2022	8.19	1187.00	820.00	23.87	7.45	216.00	176.00	19.20



Tabla 8.-Parámetros climáticos durante la prueba con agua del Efluente. Etapa AT-2.

Propiedades Atmosféricas							
Días	Temperatura del Aire (°C)	Humedad relativa (%)	Presión Atmosférica (hpa)	Radiación Solar (W/m ²)	Rapidez de viento (km/h)	Rapidez de ráfaga (km/h)	Temperatura Max. Interior (°C)
19/05/2022	29.20	9.00	859.00	624.50	8.28	15.84	65
20/05/2022	27.20	9.00	855.00	731.00	11.16	21.42	66
21/05/2022	25.70	12.00	859.10	712.50	9.72	18.72	66
22/05/2022	24.70	20.00	861.00	527.00	11.16	21.60	64
23/05/2022	24.35	34.00	859.90	439.00	6.12	11.52	62
24/05/2022	26.10	12.50	855.70	707.00	7.56	15.12	68

La segunda etapa del periodo de prueba con agua de la Planta de Tratamiento Sur comprendió las fechas del 19 de mayo al 24 de mayo, y de igual manera se midieron los parámetros físicoquímicos de temperatura, pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales. Cada día se recolectó una cantidad promedio de 500 ml de destilado, con lo que se obtuvo poco más de 3 litros en los días mencionados. (Ver tabla 7 y gráfico 4).

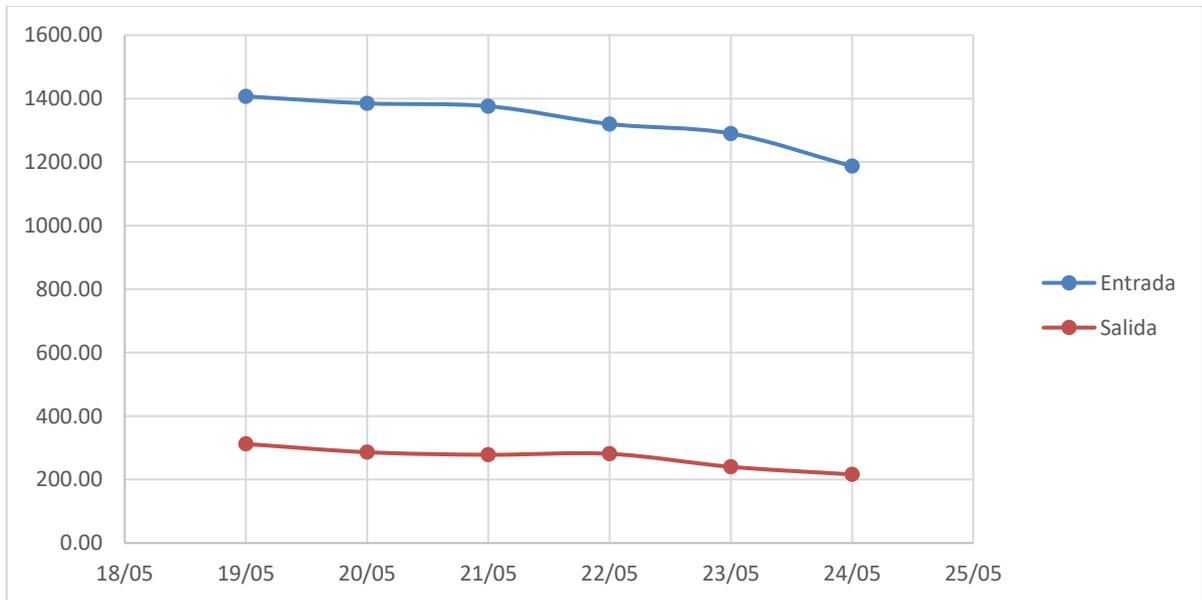


Gráfico 4.- Comparación de conductividad eléctrica de entrada y salida de la segunda etapa de agua tratada.



Las propiedades del agua colectada se volvieron a mantener estables logrando en promedio un 80% de eficiencia en la disminución de la conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos. Relacionando las tablas 2, 5 y 7 vemos que el porcentaje de eficiencia aumenta mientras disminuye la conductividad eléctrica en el afluente del destilador. En la tabla 8 observamos que la radiación solar más alta medida en este proceso fue el 24 de mayo, día con mayor porcentaje de eficiencia (82%) y mayor cantidad de agua destilada recolectada (692 ml). Comparando la gráfica 3 y la tabla 8 se muestra un comportamiento constante en reducción de la conductividad eléctrica, con una tendencia a la baja, mostrando que sí afecta la radiación solar a la calidad del agua colectada.

4.3 Análisis final de laboratorio en muestra compuesta

El volumen total recolectado fue enviado al laboratorio de Ingeniería Sanitaria en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua para su análisis químico. Los parámetros químicos analizados fueron: pH, conductividad eléctrica (CE), color, sulfatos (SO_4), cloruros (Cl^-), nitratos (NO_3), fluoruros (F^-), dureza total (DT), dureza cálcica (DC), sodio (Na), fierro (Fe), demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y demanda química de oxígeno (DQO). Ver tabla 9 y 10.

Tabla 9.- Resultados del análisis químico del efluente de la planta sur y del efluente del destilador.

Parámetros	AT-1	Destilador
Potencial de Hidrogeno	7,30	7,25
Conductividad Eléctrica	1382	239
Color	35	10
Sulfatos mg/l	47,69	15,18
Cloruros mg/l	65,08	8,26
Nitratos mg/l	6,84	0,92
Flúor mg/l	1,30	1,20
Dureza Total mg/l	164,20	58,52
Dureza Cálcica	137,68	43,90
Sodio mg/l	116,10	11,34
Fierro mg/l	<0,10	<0,10
Demanda Química de Oxígeno mg/l	15,50	0,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno mg/l	10,10	0,00



Tabla 10.- Comparación de los resultados obtenidos con los parámetros de la norma.

Parámetro	Limite Permissible NOM-014	Muestra		
		AT-1	AT-2	Efluente destilador
Potencial de Hidrogeno	6.5-8.5	7.56	7.30	7.25
Conductividad Eléctrica		1382	1563	239.00
Color	20.00	35.00	20.00	10.00
Sulfatos mg/l	400.00	50.13	47.69	15.18
Cloruros mg/l	250.00	64.11	65.08	8.26
Nitratos mg/l	10.00	6.68	6.84	6.92
Flúor mg/l	1.50	2.14	1.30	1.20
Dureza Total mg/l		152.28	164.20	58.52
Dureza Cálctica	500.00	146.64	137.68	43.90
Sodio mg/l	200.00	80.28	116.10	41.34
Fierro mg/l	0.30	<0.10	<0.10	<0.10
Demanda Química de Oxigeno mg/l		15.00	15.50	0.00
Demanda Bioquímica de Oxigeno mg/l	30.00	9.53	10.10	0.00

En la tabla 9 se observa que los parámetros representativos de la calidad del efluente del destilador bajaron considerablemente con respecto a los del efluente de la planta de tratamiento, teniendo un 84.7% de eficiencia en la disminución de conductividad eléctrica, 100% en la demanda química de oxígeno, 100% en la demanda bioquímica de oxígeno, 83% en la disminución de cloruros y 58% de eficiencia en la disminución de sodio. De manera comparativa, la productividad de un destilador solar convencional oscila en un 60% de eficiencia en la disminución de contaminantes y 5.0 L/m² en productividad (Sandeep et al., 2019). Respecto al volumen de destilado obtenido hubo problemas con fugas de vapor y de agua que no se pudieron evitar, por lo que se obtuvo menos productividad que el volumen del destilado esperado. La fuga de vapor generaba menos condensación en el vidrio y menor escurrimiento en la canaleta, se trataron estas fugas con diferentes tipos de selladores y empaques, pero por el tipo de material utilizado siempre hubo fuga de vapor.



En la tabla 10 se aprecia que todos los parámetros analizados se encuentran por debajo de los límites permisibles de la NOM-014-CONAGUA-2003 que establece la calidad de agua necesaria para recarga de acuíferos



Figura 9.- Comparación del color de agua entre el agua del efluente y del afluente del destilador.

En la figura 14 se observa la diferencia de color entre el agua colectada del destilador y el agua del efluente de la planta de tratamiento, destacando que el agua colectada (izquierda) presenta un color más claro que el agua de la planta que se encuentra a la derecha con un tono amarillento.

Es importante también destacar que el efluente de la Planta Sur no cumple a cabalidad con los requisitos para recarga que establece la NOM-014-CONAGUA-



2003, particularmente en los casos del color y el flúor. En cuanto a los sólidos disueltos totales, si bien el valor de este parámetro no excede el LMP de 1000 mg/L que especifica la norma, se trata de valores muy altos cercanos a dicho límite (entre 820 mg/L y 975 mg/L). Además, estos valores son indicativos del alto riesgo de salinización del suelo y deterioro de la calidad del acuífero nativo que pudiese ser recargado con dicha agua sin previo tratamiento terciario, como en este caso es la destilación, dado que el rango de concentración de SDT en los diversos acuíferos que abastecen a la ciudad de Chihuahua oscila entre 300 y 400 mg/L, aproximadamente.



Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- El diseño y la construcción del destilador fue el adecuado para lograr una notable mejoría en la calidad del agua, sin embargo, el uso de materiales pudo ser más eficiente si se agregase algún aditamento de calor al destilador como una manguera oscura en la salida del depósito o un cambio en el material como una tapa de vidrio más gruesa.
- La estación climatológica fue instalada con éxito y permitió efectuar una relación entre los parámetros climatológicos y fisicoquímicos.
- Las pruebas de tratabilidad en el prototipo fueron realizadas con éxito, indicando donde había áreas de oportunidad para mejorar la construcción del destilador
- La calidad del destilado obtenido a partir del tratamiento del efluente secundario de la Planta Sur de aguas residuales en el sistema de destilación solar escalonado indica que todos los parámetros analizados se encuentran dentro de los límites permisibles de la NOM-014-CONAGUA-2003 que establece la calidad de agua necesaria para recarga de acuíferos.
- Mediante las pruebas de tratabilidad realizadas en el destilador escalonado experimental de flujo continuo se probó la operatividad del sistema para un mantenimiento más eficiente que en los destiladores solares convencionales.



5.2 Recomendaciones

- Se recomienda seguir realizando trabajos relacionados a éste, donde se prueben diferentes materiales y/o accesorios para la construcción del destilador solar escalonado, con la finalidad de mejorar la producción del destilado.
- Se recomienda realizar pruebas en otras estaciones del año para probar su eficiencia en diferentes condiciones climáticas.
- Es muy conveniente que los estudios que se realicen a futuro incluyan el análisis de otros parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de interés para la salud de los posibles consumidores del agua procedente de acuíferos sujetos a recarga artificial con agua procedente de plantas de tratamiento.



Bibliografía

- Alexander, F. & Ricardo, R. (2002). *Gestión integral de tratamiento de aguas residuales*. Accelerating the world's research.
- Arunkumar & Vinothkumar. (2012). Experimental Study on Various Solar Still Designs. *International Scholarly Research Network (ISRN)*, 10(2), 1-10.
- Auge, M. (2006). Agua Subterránea. Deterioro de Calidad y Reserva. En M. Auge, *Agua Subterránea. Deterioro de Calidad y Reserva* (pág. 176). Buenos Aires, Argentina: Tilde Editora.
- Charles, R. (2002). Proceso de infiltración de agua al subsuelo. En *Propuesta de identificación de sitios para la infiltración de agua al acuífero de Querétaro* (págs. 71-96). Queretaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Chávez, R. (2011). La recarga artificial de acuíferos en México. *Jornadas Técnicas, Universidad Autónoma de México*, II(1), págs. 1-33 (6 de Junio de 2011).
- DOF. (2009). NORMA Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 1-17 (18 de Agosto de 2009).
- DOF. (2020). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 1-13 (17 de Septiembre de 2020).
- Domínguez, H. (2006). La energía solar fotovoltaica. *Energía y Medio Ambiente*, págs. 58-64 (17 de diciembre de 2006).
- Escalante, E. & Garcia, M. (2004). La Recarga Artificial De Acuíferos En El Mundo. Estado De La Cuestión Y Experiencias. *ReserchGate*, I, 1-10 (15 de Julio de 2004).
- Gutiérrez, M. (2016). Acuíferos en Chihuahua: estudios sobre sustentabilidad. *TECNOCENCIA*, 10(2), 58-63 (12 de Agosto de 2016).
- Kalogirou, S. (2014). *Solar Energy Engineering Processes and Systems* (2nd ed., Vol. 2). San Diego, United States of America: Elsevier.



- Kumar, A. (2020). An inclusive study on new conceptual designs of passive solar desalting systems. *Heliyon*, *II*(7), 1-22 (17 de Diciembre de 2020).
- López, J. (2006). Energía solar térmica. En J. López, *Energías Térmicas* (6ta ed., Vol. II, págs. 7-18). Madrid, España: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
- Martínez, A. (15 de 03 de 2019). <https://www.paratodomexico.com/estados-de-mexico/estado-chihuahua/clima-chihuahua.html>.
- Narayan, P., Mostafa, S., Edward, S., John, L., & Syed, Z. (2011). Review of component designs. En P. Narayan, *The potential of solar-driven humidification-dehumidification desalination for small-scale decentralized water production* (Vol. 14, págs. 14-32). Massachusetts, United States of America: Elsevier. (4 de Abril de 2011).
- Peña, E. Ducci, G. & Zamora, V. (2013). *Tratamiento de aguas residuales en México*. México: Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- Sandeep, J., Ramsundar, A., Nikhil, B., Shubham, T. (2019). Productivity improvement of single basin inclined solar still using enamel coating and copper chips. *Desalination and Water Treatment*, *10*(5), 161-167 (9 de May de 2019).
- Santana, L. & Foster, R. (2014). Experiencias en el uso de destiladores solares en San Luis Potosí y Chihuahua. *Asociación Nacional de Energía Solar (ANES)*, *I*(2), 1-10 (5 de Octubre de 2014).