



Proyecto de Integración
Licenciatura en Ingeniería Ambiental

“Destilación solar para remoción de arsénico en agua”

Proyecto de Investigación

Trimestre 19-O

Jesús Adrián Campos Candaudap

2133069602

acampos231129@gmail.com

Doctor en Ciencias
Israel Labastida Núñez
Departamento de Energía
iln@azc.uam.mx

Maestra en Ciencias
Sandra Chávez Sánchez
Departamento de Energía
scs@azc.uam.mx

Doctora en Ciencias
Aurora Armienta Hernández
Instituto de Geofísica, UNAM
victoria@geofisica.unam.mx

Marzo de 2020

Declaratorias

Yo, Israel Labastida Núñez, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Sandra Chávez Sánchez, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Aurora Armienta Hernández, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Jesús Adrián Campos Candaudap, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Jesús Adrián Campos Candaudap

Alumno

Dr. Israel Labastida Núñez

Asesor

M. en C. Sandra Chávez Sánchez

Asesora

Dra. Aurora Armienta Hernández

Asesora externa

Dedicatorias

A Dios, quien inspiro mi espíritu para la conclusión de este proyecto de integración y así culminar mis estudios universitarios. A toda mi familia, en especial a mis padres Martha Elena y Jesús Adrián, junto con mi hermano José Daniel quienes me dieron educación, apoyo y consejos. A mis compañeros de estudio y maestros a lo largo de mis años universitarios y finalmente a mis amigos de toda la vida Erik Vázquez, Luis Cortes, Hugo Rodríguez, Ernesto Gómez, Daniel Zapata y Jorge Ortiz quienes sin su ayuda nunca hubiera podido hacer este proyecto. A todos ellos se los agradezco desde el fondo de mi alma. Para todos ellos hago esta dedicatoria.

Agradecimientos

A mis asesores de tesis el Dr. Israel Labastida Núñez, la M. en C. Sandra Chávez Sánchez y la Dra. Aurora Armienta Hernández quienes me brindaron todo su apoyo incondicional, orientación y ayuda para que este proyecto de integración fuera posible.

A mi Universidad Autónoma Metropolitana, le agradezco por haberme permitido formar parte de ella a lo largo de estos años que nunca olvidare, gracias a todas las personas que fueron partícipes de mi vida universitaria, ya sea de manera directa o indirecta.

Tabla de contenido

Declaratorias	II
Dedicatorias	III
Agradecimientos	IV
Tabla de contenido.....	V
Índice de tablas	VII
Índice de ilustraciones.....	VIII
Resumen.....	1
1 Introducción	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Justificación	3
2 Objetivos	4
2.1 Objetivo general.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3 Marco teórico.....	4
3.1 Origen del arsénico	4
3.2 Legislación ambiental.....	5
3.2.1 Normatividad aplicada en materia de agua	6
3.3 Métodos de remoción de arsénico	16
3.3.1 Coagulación-floculación-sedimentación-filtración	16
3.3.2 Intercambio iónico	19
3.3.3 Osmosis inversa.....	20
3.3.4 Estudios de casos	21
3.4 Destilación solar	24
3.4.1 Estudios de casos	27
4 Desarrollo del proyecto.....	28
4.1 Preparación de instrumentación.....	29
4.2 Calibración de termopares tipo K.....	30
4.3 Habilitación del destilador solar y colocación de termopares.....	31
4.4 Instalación y prueba piloto del destilador solar.....	35
4.5 Preparación de muestras de As.....	35
4.6 Pruebas de destilación solar	38

4.7	Determinación de As en agua	40
4.8	Balance de energía	41
4.9	Eficiencia del destilador solar	42
4.10	Recolección de residuos de As	42
5	Resultados	43
5.1	Comportamiento de termopares tipo K durante la calibración.....	43
5.2	Comportamiento térmico del destilador solar.....	44
5.3	Volúmenes de agua destilada	47
5.4	Determinación de As en muestras de agua	48
5.5	Eficiencia térmica del destilador solar	49
6	Discusión de resultados.....	52
7	Conclusiones.....	54
8	Referencias bibliográficas	55
9	Apéndices	58

Índice de tablas

Tabla 1. Constituyentes naturales más frecuentes del As.	5
Tabla 2. Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de agua.....	6
Tabla 3. Normas Mexicanas (NMX) en materia de agua.....	12
Tabla 4. Límites permisibles de constituyentes químicos.....	15
Tabla 5. Estudios de casos para remoción de arsénico.....	21
Tabla 6. Estudios de casos para destilación solar.	27
Tabla 7. Distribución de termopares en el destilador solar.	33
Tabla 8. Volumen total de destilado en cada una de las pruebas.	47
Tabla 9. Concentración final de arsénico de cada una de las muestras.	48
Tabla 10. Concentraciones teóricas y prácticas de muestras originales.....	49

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Fases del coloide al entrar en contacto con el coagulante.	16
Ilustración 2. Fases de formación del floc.....	17
Ilustración 3. Proceso de sedimentación.	18
Ilustración 4. Proceso de filtración.....	18
Ilustración 5. Proceso simple de intercambio iónico.	19
Ilustración 6. Proceso de osmosis inversa.....	20
Ilustración 7. Proceso de destilación solar.....	25
Ilustración 8. Destilador Solar de una sola vertiente.	25
Ilustración 9. Destilador Solar de dos vertientes.	26
Ilustración 10. Destilador Solar tipo invernadero.	26
Ilustración 11. Metodología para el proyecto de remoción de arsénico en agua.	29
Ilustración 12. Conexión de todos los módulos ADAM 4000.....	30
Ilustración 13. Calibración de termopares ocupando módulos ADAM.....	31
Ilustración 14. Destilador solar tipo caseta con reflectores internos.	32
Ilustración 15. Termopares colocados en la cubierta.	34
Ilustración 16. Termopares colocados en la charola y aletas.	34
Ilustración 17. Destilador solar y equipo utilizado durante la prueba piloto.	35
<i>Ilustración 18. Compuesto de Arsenato de sodio (Na_2HAsO_4).</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 19. Balanza analítica "OHAUS" ocupada en la experimentación.</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 20. Bidón etiquetado con solución concentrada de As.....</i>	<i>37</i>
Ilustración 21. Destilador solar y equipo utilizado durante las cinco pruebas.	38
Ilustración 22. Muestras obtenidas durante las cinco pruebas cada hora.	39
Ilustración 23. Bidón con residuos de agua con arsénico.	39
Ilustración 24. Rango del espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer AAnalyst 100 con sistema de inyección en flujo continuo (FIAS) para As.	40
Ilustración 25. Espectrofotómetro Perkin Elmer AAnalyst 100 con sistema de inyección en flujo continuo (FIAS).	40
Ilustración 26. Residuos recolectados después de las cinco pruebas.....	43
Ilustración 27. Calibración de termopares tipo K.....	43
Ilustración 28. Temperaturas promedio registradas durante la prueba piloto.	44
Ilustración 29. Temperaturas registradas en prueba uno.....	45
Ilustración 30. Temperaturas registradas en prueba dos.	45
Ilustración 31. Temperaturas registradas en prueba tres.....	46
Ilustración 32. Temperaturas registradas en prueba cuatro.	46
Ilustración 33. Temperaturas registradas en prueba cinco.	47
Ilustración 34. Volumen de agua destilada obtenida durante las siete horas de cada una de las pruebas.....	48
Ilustración 35. Eficiencias del destilador solar en la primera prueba.	50
Ilustración 36. Eficiencias del destilador solar en la segunda prueba.	50
Ilustración 37. Eficiencias del destilador solar en la tercera prueba.	51
Ilustración 38. Eficiencias del destilador solar en la cuarta prueba.....	51
Ilustración 39. Eficiencias del destilador solar en la quinta prueba.....	52

Resumen

El propósito de este proyecto de investigación fue analizar y evaluar el proceso de destilación solar bajo las condiciones climatológicas de la Ciudad de México para eliminar un compuesto inorgánico presente en agua, el arsénico (As), mediante esta técnica se logra eliminar el compuesto y el agua destilada puede ser empleada para consumo humano.

El proceso se evaluó mediante la destilación de muestras de agua sintética con diferentes concentraciones de As (0.016, 0.05, 0.33, 0.5 y 0.0283 mg/l), por medio de cinco pruebas realizadas durante 7 horas cada una y se obtuvo la eficiencia del destilador por medio de su comportamiento térmico y por otro lado la eficiencia de eliminación del As ocupando este método.

En cada una de las cinco pruebas se ocupó un destilador solar tipo caseta aletado, con reflectores internos, el cual tenía conectado (en diferentes puntos), termopares tipo K y éstos fueron acoplados a los módulos ADAM que tienen como objetivo mandar a una computadora con softwares instalados (ADAM-4000 Utility y LabView), las señales de temperatura y radiación solar; para así obtener el comportamiento térmico del mismo, mientras que durante cada hora de experimentación se obtuvo un volumen de agua destilada para ser analizada. Posteriormente, cada muestra de agua destilada se analizó con un espectrofotómetro Perkin Elmer AAnalyst 100 con sistema de inyección en flujo continuo (FIAS) para determinar su concentración final de As.

Los resultados arrojados durante este proyecto de investigación reflejan que la técnica de destilación solar tiene una eficiencia de remoción cercana al 100% para el As, ya que desde las muestras destiladas en la primera hora se demostró la eliminación del As. Mientras que, por otro lado, el destilador solar demostró tener eficiencias máximas del 14.9, 19.4, 13.5, 21.7 y 20.3% para la prueba 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente dando así un promedio de eficiencia máxima del 18%.

1 Introducción

El agua subterránea es indispensable para los humanos, es considerada como un recurso natural no renovable, esto gracias a que su agotamiento a corto plazo se debe a una extracción mayor que su tasa de renovación natural. Su distribución alrededor del planeta es de unos 15 millones de km³ de agua superficial (Aguilar, 2009).

En la República Mexicana se contabilizaron aproximadamente 653 acuíferos de agua subterránea en el año 2014. Estos acuíferos subterráneos funcionan como una fuente de acopio, redes de acueductos y plantas de tratamientos naturales (SEMARNAT, 2015).

El agua para consumo humano se ve afectada por dos variables principales: el aumento de su consumo debido al crecimiento de la población y por la contaminación debido a la presencia de diversos compuestos, entre ellos los inorgánicos (Sepúlveda, 2009).

En México se han realizado estudios sobre la calidad del agua subterránea respecto al arsénico (As), por algunas universidades del país y por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), los resultados presentaron concentraciones superiores a la normatividad (0.025 mg por litro) en por lo menos 178 municipios ubicados en 23 estados (entre ellos Chihuahua, Zacatecas, Durango, San Luis Potosí, Jalisco, Sonora, Coahuila, Baja California Sur e Hidalgo). Los intervalos de concentración reportados son de 0.003 a 0.53 mg de As por litro de agua (Aguirre Lozano *et al.*, 2018).

Existen diferentes métodos utilizados para la remoción de compuestos inorgánicos como el As, tales como: la adsorción con alúmina activada, adsorción con carbón activado, intercambio iónico, ósmosis inversa, electroquímicos, nanofiltración, entre otros (Paredes, 2012).

Entre los métodos de reciente aplicación se encuentra la destilación solar, que es de bajo costo, ya que hace uso de uno de los recursos más abundantes, la radiación solar. Dicha radiación en México es mucho mayor en comparación con otros países, esto gracias a que se encuentra entre los 15° y 35° de latitud y esta zona es considerada la mejor para aprovechar los recursos solares (Limón Portillo, 2017). La International Renewable Energy Agency reportó en el año 2015 que México recibió diariamente, en promedio, $5.5 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ (unidad de medición de radiación solar). En este proyecto se realizó la remoción del As en el agua, ocupando radiación y un destilador solar.

1.1 Antecedentes

La destilación solar es un método alternativo que puede ser igual de eficiente que otras tecnologías de última generación (contando con otros beneficios tales como económicos y de accesibilidad). Entre sus usos se encuentra la desinfección, por ejemplo, se han efectuado investigaciones en la región de Brasil, donde se construyó un destilador piloto con el objetivo de remover microorganismos como los coliformes fecales y *Escherichia coli* en agua, esto gracias a la susceptibilidad que tienen a la radiación UV generada por el sol. Los resultados obtenidos presentaron una remoción del 100% de los microorganismos, comprobando que es una opción factible (Nascimento *et al.*, 2018).

En otro estudio se realizaron pruebas en agua de mar para obtener el porcentaje de remoción de sal en un destilador solar conectado a un colector en la Universidad Católica del Norte, en Chile. El destilador solar era modular, compacto y de bajo costo y logró tener una eficiencia de remoción

de sal del 34.04% junto con una producción de agua destilada de 2.37 litros por día, esto dependiendo del caudal que ingresaba al destilador y del clima de la zona (Mercado y Lam, 2015).

En cuanto al As, estudios realizados muestran que cuando este elemento se encuentra en aguas subterráneas afecta, en la medida de su consumo, la salud pública. Como parte de un estudio realizado en Italia, se analizaron los diferentes tratamientos y tecnologías de remoción que se le puede dar a este compuesto inorgánico, en donde se compararon los tipos de tecnologías en plantas de tratamiento. El resultado arrojó que las tecnologías más utilizadas para las plantas de tratamiento son de adsorción con hidróxido férrico granular, ósmosis inversa e intercambio iónico (Sorlini *et al.*, 2014).

Tratando lo anterior, se tienen escasos estudios relacionados con el tratamiento de agua para remoción de arsénico por medio de la destilación solar en México, aunque existen investigaciones por separado. Tal es el caso registrado por Escobedo Bretado (2009), el cual menciona la utilización de un modelador y simulador llamado TRNSYS utilizado para optimizar la destilación solar para remoción de sales en agua, en donde demuestra la importancia de utilizar herramientas de cómputo para determinar el comportamiento térmico (temperatura y radiación solar) del destilador. Por otra parte, las investigaciones sobre remoción de As en México presentan diferentes técnicas en cuanto a la separación de este compuesto inorgánico en el agua, un ejemplo de esto es el estudio donde se ocupó un tratamiento de coagulación-floculación (proceso fisicoquímico) con diferentes concentraciones de As, para el cual se efectuaron más de 100 pruebas para obtener las eficiencias de remoción desde 0% hasta 95%, esto dependiendo de la concentración de As en el agua, el tipo de coagulante y el pH. Se observó que al incorporar cloruro férrico se obtuvo un porcentaje de remoción del 95% y con el sulfato de aluminio del 80%. Aparte se demostró que los mejores porcentajes de remoción dependían del pH los cuales fueron entre 3 y 5 (Francisca y Carro Pérez, 2014).

1.2 Justificación

La contaminación del agua subterránea ha ido en aumento, convirtiéndose en un problema a nivel nacional, pues es vulnerable ante la presencia de compuestos inorgánicos tales como el As, cuyo origen puede deberse a causas naturales o antropogénicas, y puede encontrarse en concentraciones superiores a las establecidas en la NOM-127-SSA1-1994, para agua de uso y consumo humano.

La problemática de instalar plantas potabilizadoras para el tratamiento del agua subterránea en zonas rurales ha hecho factible la búsqueda de nuevas tecnologías alternativas para su potabilización, entre ellas se encuentra la destilación solar. La cual es una técnica desarrollada principalmente con ventajas económicas, por el ahorro en el consumo de energía eléctrica, además, de que se reduce la contaminación ambiental mediante el descenso de emisión de sustancias nocivas por el uso de combustibles fósiles en la obtención de agua potable.

Es por ello que el empleo de un destilador solar es una opción a los problemas de contaminación de agua subterránea por As que sufren algunos estados de México, en los que predomina el clima árido o semiárido, lo que favorece la presencia de la radiación solar en gran parte del año. Lo anterior hace posible el uso de la destilación solar para la potabilización del agua, dando pie a una solución sostenible y considerando las necesidades reales y particulares de abastecimiento de agua en zonas rurales del país.

Con esta técnica se puede ahorrar en el consumo de energía eléctrica, se disminuyen los costos del proceso de destilación de agua y se evita la adición de reactivos. Se han realizado diferentes estudios utilizando un destilador solar para la desalinización del agua, pero no hay tratamientos previos para el agua contaminada con As utilizando esta tecnología. Así con este proyecto se pretende remover el As presente en agua, para que de esta forma se le pueda dar un uso alternativo al agua destilada.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de destilación solar para la remoción de arsénico en agua a diferentes concentraciones.

2.2 Objetivos específicos

1. Identificar y medir las principales variables que caracterizan el funcionamiento térmico del destilador solar, utilizando sensores para temperatura y radiación solar.
2. Determinar el porcentaje de remoción de arsénico por medio de generación de hidruros.
3. Evaluar el comportamiento térmico del destilador solar mediante un balance de energía.

3 Marco teórico

3.1 Origen del arsénico

El arsénico (As) es un compuesto inorgánico el cual abunda en la corteza terrestre (suelo, rocas, cuerpos de agua, minerales) y su distribución depende de las características geoquímicas y de la actividad humana de la zona. El origen natural de este compuesto se atribuye principalmente a las actividades ambientales, tales como emisiones volcánicas y reacciones biogeoquímicas, y por otra gran parte se atribuye a actividades antropogénicas (Rangel Montoya *et al*, 2015).

Dicho elemento es considerado como uno de los más tóxicos, tanto para el ambiente (siendo este ya un problema a nivel nacional) como para la salud humana (generando problemas en la piel, cáncer de hígado, vejiga y pulmón en la población afectada), ya que estudios realizados para saber el peligro de este compuesto arrojan que no solo es tóxico en altas concentraciones, sino que también es extremadamente tóxico con concentraciones muy bajas por un largo periodo de tiempo (Lillo y Gemm, 2007).

Una de las principales variables en este problema de contaminación por As, es que este elemento inorgánico presenta una gran facilidad para trasladarse de una región a otra, contaminando sus fuentes de transporte naturales, y por otra parte, el ser humano ha atribuido de forma antropogénica a magnificar esta problemática, gracias a la actividad minera, al uso de combustibles fósiles, pesticidas, herbicidas y otros compuestos ocupados como aditivos para la ganadería (Rangel Montoya *et al*, 2015).

El As puede presentarse como un constituyente natural en más de 200 minerales. En la tabla 1, se muestran los más comunes (Lillo y Gemm, 2007):

Tabla 1. Constituyentes naturales más frecuentes del As.

Mineral	Composición	Ocurrencia
Arsénico nativo.	As	Venas hidrotermales.
Niccolita.	$NiAs$	Filones y noritas.
Rejalgar.	AsS	Filones, muchas veces asociado con oropimente, arcillas y carbonatos en "hot springs".
Oropimente.	As_2S_3	Venas hidrotermales, "hot springs". También como producto de sublimación de emanaciones volcánicas.
Cobaltita.	$CoAsS$	Depósitos de alta temperatura, rocas metamórficas.
Arsenopirita.	$FeAsS$	Es el mineral de As más abundante. Muy frecuente en filones.
Tennantita.	$(Cu, Fe)_{12}As_4S_{13}$	Venas hidrotermales.
Enargita.	Cu_3AsS_4	Venas hidrotermales.
Arsenolita.	As_2O_3	Mineral secundario formado por oxidación de arsenopirita, arsénico nativo y otros minerales de arsénico.
Claudetita.	As_2O_3	Mineral secundario formado por oxidación de realgar, arsenopirita, y otros minerales de arsénico.
Hematolita.	$(Mn, Mg)_4Al(AsO_4)(OH)_8$	Mineral en fisuras de rocas metamórficas.

El As se puede presentar de forma insoluble y soluble, siendo la segunda forma, tóxico para la población, ya que en este estado de oxidación se presentan dos tipos de As, el cual es arseniato As(V) y arsenito As(III). El As(III) se encuentra en diferentes compuestos, los cuales dependen del pH del medio y del potencial redox, generando que esta forma química sea más tóxica y más difícil de remover en un medio acuoso (Rangel Montoya *et al*, 2015).

3.2 Legislación ambiental

La legislación ambiental en México ha empezado a tener una mayor importancia en los últimos años, siendo ésta la encargada de poder regular, controlar o monitorear (con base en acuerdos, convenios, leyes, normas) la interacción que tiene el ser humano con el ambiente en materia de agua, aire y suelo; esto con el principal objetivo de reducir los impactos por la actividad humana por medio de la preservación de los recursos y es por esto que una parte importante dentro de la legislación ambiental son las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y las Normas Mexicanas (NMX), las cuales ayudan a regular la materia ambiental en nuestro país.

3.2.1 Normatividad aplicada en materia de agua

A continuación, la Tabla 2 presenta las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de agua que establecen límites permisibles, junto con especificaciones o requisitos para el cumplimiento de éstas. En esta tabla se adjunta la descripción general de los objetivos de cada una de ellas.

Tabla 2. Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de agua.

Normatividad	Nombre de la normatividad	Descripción de la normatividad
NOM-001-SEMARNAT-1996	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM- 001-SEMARNAT-1996, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES”.	Establece límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, para proteger su calidad y posibilitar sus usos.
NOM-002-SEMARNAT-1996	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-002-SEMARNAT-1996, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO URBANO O MUNICIPAL”.	Establece límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas.
NOM-003-SEMARNAT-1997	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-003-SEMARNAT-1997, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS QUE SE REÚSEN EN SERVICIOS AL PÚBLICO”.	Establece límites permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se usen nuevamente en servicios al público.

Tabla 2. Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de agua.

Continuación.

NOM-004-SEMARNAT-2002	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-004-SEMARNAT-2002, PROTECCION AMBIENTAL. - LODOS Y BIOSOLIDOS. - ESPECIFICACIONES Y LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA SU APROVECHAMIENTO Y DISPOSICION FINAL”.	Establece especificaciones y límites permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, para posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana.
NOM-001-CONAGUA-2011	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-CNA-2011, SISTEMAS DE AGUA POTABLE, TOMA DOMICILIARIA Y ALCANTARILLADO SANITARIO-HERMETICIDAD-ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA”.	Establece especificaciones de desempeño para los productos que integran los sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario, para asegurar la hermeticidad de éstos a largo plazo, junto con condiciones y métodos de prueba para asegurar una instalación hermética.
NOM-002- CONAGUA-1995	“NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-002-CNA-1995, TOMA DOMICILIARIA PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE - ESPECIFICACIONES Y METODOS DE PRUEBA”.	Establece especificaciones y métodos de prueba que debe cumplir la toma domiciliaria para el abastecimiento de agua potable, para preservar el agua, sin modificar sus propiedades fisicoquímicas.
NOM-003-CONAGUA-1996	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-003-CNA-1996, REQUISITOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS DE EXTRACCIÓN DE AGUA PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS”.	Establece requisitos de construcción que se deben cumplir durante la perforación de pozos para la extracción de aguas, con objeto de evitar la contaminación de los acuíferos.

Tabla 2. Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de agua.

Continuación.

NOM-004-CONAGUA-1996	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-004-CNA-1996, REQUISITOS PARA LA PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS DURANTE EL MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN DE POZOS DE EXTRACCIÓN DE AGUA Y PARA EL CIERRE DE POZOS EN GENERAL”.	Establece medidas de protección a la calidad del agua en los acuíferos durante los trabajos de mantenimiento, rehabilitación y cierre de pozos, sea en forma temporal o definitiva.
NOM-005-CONAGUA-1996	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-005-CNA-1996, FLUXOMETROS-ESPECIFICACIONES Y METODOS DE PRUEBA”.	Establece especificaciones y métodos de prueba que deben cumplir los fluxómetros para tazas de inodoros y mingitorios para asegurar el ahorro de agua en su uso y funcionamiento.
NOM-006-CONAGUA-1997	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-006-CNA-1997. FOSAS SÉPTICAS PREFABRICADAS - ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA”.	Establece especificaciones y métodos de prueba de las fosas sépticas prefabricadas, para el tratamiento de las aguas residuales de tipo doméstico, para asegurar su confiabilidad y contribuir a la preservación de los recursos hídricos y del ambiente.
NOM-007-CONAGUA-1997	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-007-CNA-1997. REQUISITOS DE SEGURIDAD PARA LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE TANQUES PARA AGUA”.	Establece requisitos de seguridad que deben cumplirse en la construcción y operación de tanques de 3000 m ³ de capacidad o mayores, que contengan agua y que se utilicen en los Sistemas de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.
NOM-008-CONAGUA-1998	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-008-CNA-1998, REGADERAS EMPLEADAS EN EL ASEO CORPORAL - ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA”.	Establece especificaciones y métodos de prueba que deben cumplir las regaderas empleadas en el aseo corporal, con el fin de asegurar el ahorro de agua.
NOM-009-CONAGUA-2001	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-009-CNA-2001, INODOROS PARA USO SANITARIO-ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA”.	Establece especificaciones y métodos de prueba que deben cumplir los inodoros, para asegurar el ahorro de agua en su uso y funcionamiento hidráulico.

Tabla 2. Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de agua.

Continuación.

NOM-010-CONAGUA-2000	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-010-CNA-2000, VÁLVULA DE ADMISIÓN Y VÁLVULA DE DESCARGA PARA TANQUE DE INODORO-ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA”.	Establece especificaciones y métodos de prueba que deben cumplir las válvulas de admisión, las válvulas de descarga y elementos de operación y/o sello que se instalan en los tanques de inodoros, con el fin de asegurar el consumo eficiente del agua.
NOM-011-CONAGUA-2015	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-011-CNA-2015, CONSERVACIÓN DEL RECURSO AGUA-QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES Y EL MÉTODO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE LAS AGUAS NACIONALES”.	Establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales y del subsuelo, para su explotación, uso o aprovechamiento.
NOM-013-CONAGUA-2000	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-013-CNA-2000. REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE-ESPECIFICACIONES DE HERMETICIDAD Y MÉTODOS DE PRUEBA”.	Establece especificaciones y métodos de prueba, que debe cumplir la red de distribución de agua potable para garantizar su hermeticidad y estanquidad, con el fin de preservar el recurso hidráulico y evitar su contaminación.
NOM-014-CONAGUA-2003	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-014-CNA-2003, REQUISITOS PARA LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS CON AGUA RESIDUAL TRATADA”.	Establece requisitos que deben cumplir: la calidad del agua, la operación y el monitoreo utilizados en los sistemas de recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
NOM-015-CONAGUA-2007	“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-015-CNA-2007, INFILTRACIÓN ARTIFICIAL DE AGUA A LOS ACUÍFEROS. – CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES DE LAS OBRAS Y DEL AGUA”.	Protege la calidad del agua de los acuíferos y provechar el agua pluvial y de escurrimientos superficiales para aumentar la disponibilidad de agua subterránea a través de la infiltración artificial.

Tabla 2. Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de agua.

Continuación.

<p>NOM-117-SSA1-1994</p>	<p>“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-117-SSA1-1994, BIENES Y SERVICIOS. MÉTODO DE PRUEBA PARA LA DETERMINACIÓN DE CADMIO, ARSÉNICO, PLOMO, ESTAÑO, COBRE, FIERRO, ZINC Y MERCURIO EN ALIMENTOS, AGUA POTABLE Y AGUA PURIFICADA POR ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA”.</p>	<p>Establece métodos de prueba de espectrometría de absorción atómica para determinar cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio presentes en alimentos, bebidas, agua purificada y agua potable.</p>
<p>NOM-127-SSA1-1994</p>	<p>“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION”.</p>	<p>Establece límites máximos permisibles de calidad y tratamiento en la potabilización del agua y su consumo para el abastecimiento de la población en la república mexicana.</p>
<p>NOM-179-SSA1-1998</p>	<p>“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-179-SSA1-1998, VIGILANCIA Y EVALUACIÓN DEL CONTROL DE CALIDAD DEL AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO, DISTRIBUIDA POR SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO PÚBLICO”.</p>	<p>Establece requisitos y especificaciones que deben observarse en las actividades de control de la calidad del agua para uso y consumo humano.</p>
<p>NOM-201-SSA1-2015</p>	<p>“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-201-SSA1-2015, PRODUCTOS Y SERVICIOS. AGUA Y HIELO PARA CONSUMO HUMANO, ENVASADOS Y A GRANEL. ESPECIFICACIONES SANITARIAS”.</p>	<p>Establece características y especificaciones sanitarias que deben cumplir el agua y el hielo para consumo humano que se comercialice preenvasado o a granel y los establecimientos que se dediquen al proceso o importación de estos productos.</p>

Tabla 2. Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de agua.

Continuación.

<p>NOM-230-SSA1-2002</p>	<p>“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-230-SSA1-2002, SALUD AMBIENTAL. AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO, REQUISITOS SANITARIOS QUE SE DEBEN CUMPLIR EN LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO PÚBLICOS Y PRIVADOS DURANTE EL MANEJO DEL AGUA. PROCEDIMIENTOS SANITARIOS PARA EL MUESTREO”.</p>	<p>Establece requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua, con el fin de preservar la calidad del agua para uso y consumo humano, así como procedimientos sanitarios para su muestreo.</p>
<p>NOM-245-SSA1-2010</p>	<p>“NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-245-SSA1-2010, REQUISITOS SANITARIOS Y CALIDAD DEL AGUA QUE DEBEN CUMPLIR LAS ALBERCAS”.</p>	<p>Establece especificaciones sanitarias que deben cumplir todas las albercas de centros vacacionales, clubes deportivos, balnearios, centros de enseñanza, hoteles, moteles, desarrollos turísticos, parques acuáticos o cualquiera que preste un servicio público, con el propósito de minimizar o controlar riesgos a la salud de los usuarios.</p>
<p>PROY-NOM-179-SSA1-2017</p>	<p>“PROYECTO DE NORMA OFICIAL MEXICANA PROY-NOM-179-SSA1-2017, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA DISTRIBUIDA POR LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA”.</p>	<p>Establece disposiciones sanitarias que deben cumplir los organismos responsables en todo el territorio nacional, con el fin de mantener la calidad del agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua.</p>

Tabla 2. Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de agua.

Continuación.

PROY-NOM-250-SSA1-2014	"PROYECTO DE NORMA OFICIAL MEXICANA PROY-NOM-250-SSA1-2014, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE LA CALIDAD DEL AGUA Y REQUISITOS SANITARIOS QUE DEBEN CUMPLIR LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PÚBLICOS Y PRIVADOS, SU CONTROL Y VIGILANCIA. PROCEDIMIENTO SANITARIO DE MUESTREO".	Establece requisitos, procesos, límites máximos permisibles, guías de procesos y muestreos sanitarios que deben cumplir las instalaciones hidráulicas de los sistemas de abastecimiento de agua.
------------------------	---	--

Por otra parte, la Tabla 3 presenta las Normas Mexicanas (NMX) en materia de agua que establecen lineamientos, junto con metodologías o procedimientos de pruebas para la determinación o medición de contaminantes o microorganismos. En esta tabla se adjunta la descripción general de los objetivos de cada una de ellas.

Tabla 3. Normas Mexicanas (NMX) en materia de agua.

Normatividad	Nombre de la normatividad	Descripción de la normatividad
NMX-AA-003-1980	"NORMA MEXICANA NMX-AA-3-1980, AGUAS RESIDUALES. - MUESTREO"	Establece lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, para determinar sus características físicas y químicas, debiéndose observar las modalidades indicadas en las normas de métodos de prueba correspondientes.
NMX-AA-004-SCFI-2013	"NORMA MEXICANA NMX-AA-004-SCFI-2013, ANÁLISIS DE AGUA – MEDICIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA".	Establece el método de prueba para medir los sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

Tabla 3. Normas Mexicanas (NMX) en materia de agua.

Continuación.

NMX-AA-005-SCFI-2013	“NORMA MEXICANA NMX-AA-005-SCFI-2013, ANÁLISIS DE AGUA – MEDICIÓN DE GRASAS Y ACEITES RECUPERABLES EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS – MÉTODO DE PRUEBA”.	Establece un método de análisis para determinar/medir las grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-006-SCFI-2000	“NORMA MEXICANA NMX-AA-006-SCFI-2000, ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE MATERIA FLOTANTE EN AGUAS RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA”.	Establece el método de prueba para determinar la materia flotante en las aguas residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-026-SCFI-2010	“NORMA MEXICANA NMX-AA-026-SCFI-2010, ANÁLISIS DE AGUA - MEDICIÓN DE NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA”.	Establece el método de prueba para la determinación/medición de nitrógeno total Kjeldahl en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-029-SCFI-2001	“NORMA MEXICANA NMX-AA-029-SCFI-2001, ANÁLISIS DE AGUAS - DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA”.	Establece dos métodos de análisis para la determinación de fósforo total en las aguas residuales, naturales y residuales tratadas.
NMX-AA-034-SCFI-2015	“NORMA MEXICANA NMX-AA-034-SCFI-2015, ANÁLISIS DE AGUA – DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS Y SALES DISUELTAS EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS – MÉTODO DE PRUEBA”.	Establece el método de medición cuantitativa de sólidos y sólidos disueltos, así como la cantidad de materia orgánica contenida en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

Tabla 3. Normas Mexicanas (NMX) en materia de agua.

Continuación.

NMX-AA-042-SCFI-2015	“NORMA MEXICANA NMX-AA-042-SCFI-2015, ANÁLISIS DE AGUA - ENUMERACIÓN DE ORGANISMOS COLIFORMES TOTALES, ORGANISMOS COLIFORMES FECALES (TERMOTOLERANTES) Y <i>Escherichia coli</i> – MÉTODO DEL NÚMERO MÁS PROBABLE EN TUBOS MÚLTIPLES”.	Establece el método de enumeración en el agua de organismos coliformes, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y <i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>) mediante un cultivo en un medio líquido contenido en tubos múltiples y cálculo de su número más probable (NMP) en la muestra, en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-051-SCFI-2001	“NORMA MEXICANA NMX-AA-042-SCFI-2015, ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE METALES POR ABSORCIÓN ATÓMICA EN AGUAS NATURALES, POTABLES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA”.	Establece el método de espectrofotometría de absorción atómica para la determinación de metales disueltos, totales, suspendidos y recuperables en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-115-SCFI-2001	“NORMA MEXICANA NMX-AA-042-SCFI-2015, ANÁLISIS DE AGUA - CRITERIOS GENERALES PARA EL CONTROL DE LA CALIDAD DE RESULTADOS ANALÍTICOS”.	Especifica algunos criterios generales para el aseguramiento y control de la calidad de resultados analíticos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.

Este proyecto consideró lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994 que establece la "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO,-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION" ya que se menciona la cantidad de arsénico (As) permitida en el agua de consumo.

- **Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994**

La Secretaria de Salud (1995) establece en esta norma los límites permisibles de los constituyentes químicos que pueden presentarse en el agua de consumo, tal es el caso del As. Los límites permisibles se expresan en las siguientes tablas:

Tabla 4. Límites permisibles de constituyentes químicos.

Característica	Límite permisible
Aluminio	0.20 mg/l
Arsénico*	0.025 mg/l
Bario	0.70 mg/l
Cadmio	0.005 mg/l
Cianuros	0.07 mg/l
Cloro residual libre	0.2-1.50 mg/l
Cloruros	250.00 mg/l
Cobre	2.00 mg/l
Cromo total	0.05 mg/l
Dureza total	500.00 mg/l
Fenoles o compuestos fenólicos	0.3 mg/l
Fierro	0.30 mg/l
Fluoruros	1.50 mg/l
Hidrocarburos aromáticos	
Benceno	10.00 mg/l
Etilbenceno	300.00 mg/l
Tolueno	700.00 mg/l
Xileno (tres isómeros)	500.00 mg/l
Manganeso	0.15 mg/l
Mercurio	0.001 mg/l
Nitratos	10.00 mg/l
Nitritos	1.00 mg/l
Nitrógeno amoniacal	0.50 mg/l
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Plaguicidas	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03 mg/l
Clordano (total de isómeros)	0.20 mg/l
DDT (total de isómeros)	1.00 mg/l
Gamma-HCH (lindano)	2.00 mg/l
Hexaclorobenceno	1.00 mg/l
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03 mg/l
Metoxicloro	20.00 mg/l
2,4 – D	30.00 mg/l
Plomo	0.01 mg/l
Sodio	200.00 mg/l
Sólidos disueltos totales	1000.00 mg/l
Sulfatos	400.00 mg/l
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50 mg/l
Trihalometanos totales	0.20 mg/l
Yodo residual libre	0.2-0.5 mg/l
Zinc	5.00 mg/l

3.3 Métodos de remoción de arsénico

Los procesos de remoción de arsénico (As) en agua constituyen una parte importante para la restauración ambiental, ya que como se ha mencionado antes, el As es un compuesto inorgánico el cual afecta a gran parte de la población en la república mexicana generando problemas graves para la salud. En la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, publicada por la Secretaria de la Salud (1994), para el arsénico, se recomienda como método de remoción la coagulación-floculación-sedimentación-filtración, intercambio iónico u osmosis inversa.

3.3.1 Coagulación-floculación-sedimentación-filtración

Una parte importante de la restauración ambiental tiene que ver con el tratamiento de aguas para la eliminación de contaminantes que existen en ellas, por lo cual existen procesos unitarios que dan buenos resultados a la hora de eliminar o remover compuestos inorgánicos como el As. Dichos procesos unitarios ocupados para la remoción del As son la coagulación, floculación, sedimentación y la filtración.

- **Coagulación**

En las plantas de tratamiento fisicoquímico, se tiene como objetivo principal el desestabilizar las partículas coloidales mediante el uso de coagulantes para ser removidas en los procesos posteriores de sedimentación y filtración. Este proceso depende del coagulante ocupado (por ejemplo, sulfato de aluminio, sulfato ferroso, sulfato y el cloruro férrico, dichos coagulantes serán ocupados dependiendo el tipo de agua y el pH de ésta), la dosis suministrada (se debe realizar una “prueba de jarras” en la cual se experimenta a diferentes dosis de coagulante para saber cuál es la óptima) y el pH de la muestra (Chulluncuy Camacho, 2011).

Usualmente los coloides cuentan con una carga eléctrica que ocasiona que se rechacen entre ellas mismas, por lo cual al adicionar un coagulante dichas cargas eléctricas se neutralizan para poder tener una interacción contaminante-coagulante (usualmente el coagulante cuenta con carga positiva para poder neutralizar las cargas negativas de los coloides), tal como se muestra en la Ilustración 1, la cual muestra estos cambios de fases antes y después del coagulante.

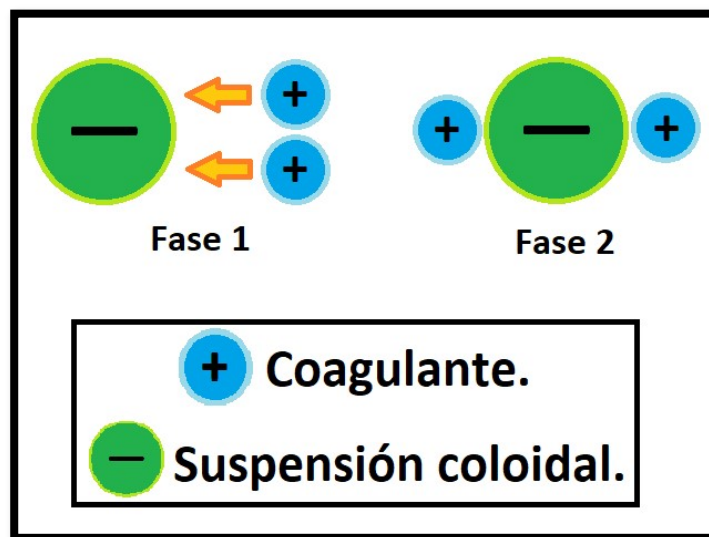


Ilustración 1. Fases del coloide al entrar en contacto con el coagulante.

- **Floculación**

Este proceso unitario tiene como principal objetivo el poder aglomerar los coloides desestabilizados por el coagulante. La aglomeración forma “flocs” los cuales incrementan su densidad, por lo cual se puede sedimentar gracias a la fuerza de gravedad, logrando así separar a los lodos del agua en el siguiente proceso. Este proceso de floculación se muestra en la Ilustración 2, la cual presenta estos cambios de fases después de la adición del floculante.

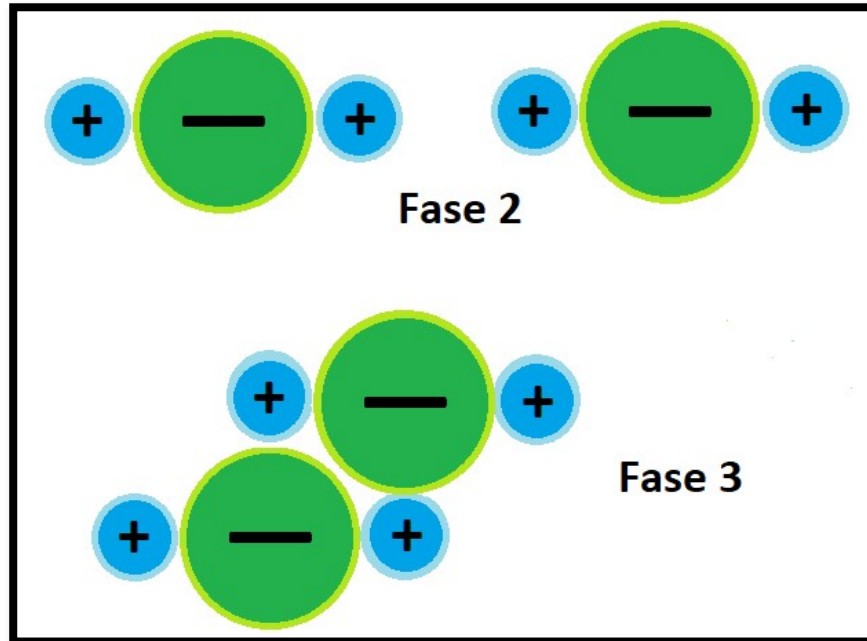


Ilustración 2. Fases de formación del floc.

Durante la floculación no solo se remueve la turbiedad y el color, sino que también se eliminan bacterias, virus, organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación-floculación, algas y otras sustancias que producen sabor y olor (Chulluncuy Camacho, 2011). Por último, es de gran importancia mencionar que se necesita tener un especial cuidado al realizar los procesos de coagulación-floculación, ya que de estos depende la eficiencia en los procesos posteriores de sedimentación y filtración.

- **Sedimentación**

Este proceso unitario está relacionado con la fuerza de gravedad, por la cual el floc ya formado en los procesos previos cuenta con un volumen y se vuelve más denso que el agua, por lo cual empieza a sedimentar. Este proceso depende del tipo de agua y de partículas suspendidas que quieran removerse y se puede llevar a cabo en diferentes tipos de sedimentadores, los cuales pueden ser sedimentadores o decantadores estáticos (estos son los más usados), decantadores dinámicos y decantadores laminares (Chulluncuy Camacho, 2011). El producto resultante después de la sedimentación es agua sin materia orgánica coloidal y otros contaminantes junto con lodos (flocs sedimentados), los cuales necesitan ser tratados posteriormente a su obtención. Este proceso de sedimentación se muestra en la Ilustración 3, en la cual se muestra el proceso unitario posterior a la coagulación y floculación (Chulluncuy Camacho, 2011).

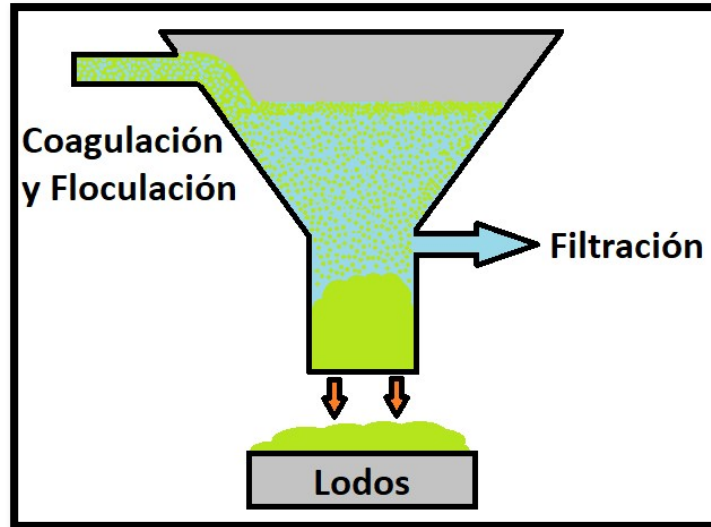


Ilustración 3. Proceso de sedimentación.

- **Filtración**

Este proceso tiene como principal objetivo el poder eliminar las pequeñas partículas o microorganismos que no pudieron ser removidas en los procesos previos, éste consiste en pasar el agua por una sección donde se presenta un medio poroso, en dicho medio quedan retenidas las partículas y microorganismos desde flóculos de 1 mm hasta coloides, bacterias y virus inferiores a 10^{-3} mm (Chulluncuy Camacho, 2011). Este proceso de filtración se muestra en la Ilustración 4, en ella se presenta el desarrollo de este proceso unitario por medio de algún material filtrante.

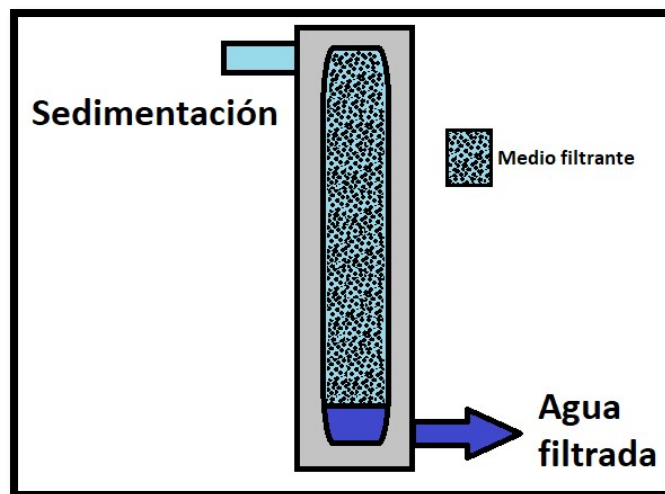


Ilustración 4. Proceso de filtración.

En el proceso unitario de la filtración ocurren dos principales etapas complementarias que hacen posible la eliminación de los compuestos o contaminantes en el agua previamente tratada:

1. Transporte de las partículas dentro de los poros.

Está relacionado con la transferencia de masa y es un fenómeno físico e hidráulico, por lo cual no se trata de una manifestación donde ocurre una transferencia de forma superficial, más bien este proceso es interno o dentro del material filtrante (Chulluncuy Camacho, 2011).

2. Adherencia a los granos del medio.

Este fenómeno está relacionado con la transferencia de masa a nivel superficial, por lo cual está influenciado por parámetros físicos y químicos. La interacción entre el contaminante y/o microorganismo ocurre al contacto superficial con el material filtrante (Chulluncuy Camacho, 2011).

3.3.2 Intercambio iónico

El intercambio iónico es un tecnología que tiene como principal objetivo el ablandar, desmineralizar y remover sustancias o contaminantes por medio de procesos tales como desalcalinización, desionización y desinfección en diferentes tipos de agua.

Este proceso químico se da gracias a que dicha tecnología se encarga de cambiar los iones no deseados disueltos en agua por otros iones de carga similar, todo este proceso ocurre por medio de una resina colocada en una columna por la cual pasa un líquido y así se pueden remover varios contaminantes. Un ejemplo claro de esto es al aplicar un intercambio aniónico (iones cargados negativamente) para intercambiar el arsénico (As) por otros aniones en el agua, tal como se muestra en la Ilustración 5, la cual muestra estos intercambios de iones no deseados por iones no dañinos para la salud (Reyna Ávila, 2014).

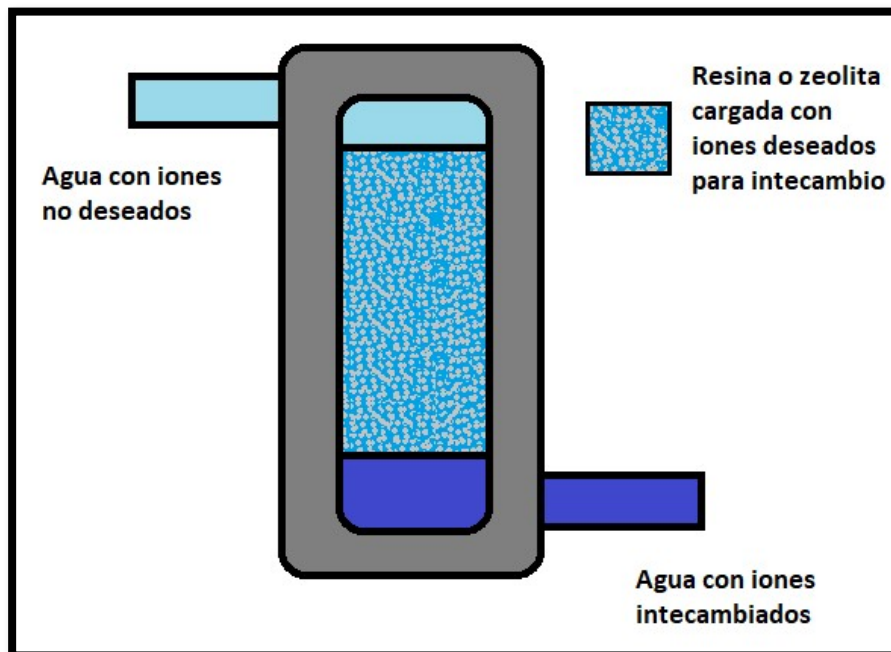


Ilustración 5. Proceso simple de intercambio iónico.

3.3.3 Osmosis inversa

Esta tecnología se utiliza para purificar el agua en procesos industriales y también para producir agua potable, dicha tecnología consiste en la utilización de una membrana de osmosis inversa que está fabricada principalmente de película delgada TFC, que consiste en una capa activa de poliamida de entre 50 y 250 nm de grosor, un soporte asimétrico de polisulfona de aproximadamente 50 μm de grosor y de tela de poliéster de aproximadamente 300 μm de espesor (Ferrer *et al*, 2016). Ocupando la osmosis inversa se pueden llegar a eliminar microorganismos (como bacterias) y contaminantes suspendidos en ellas (como compuestos inorgánicos).

La osmosis inversa se lleva a cabo gracias a un fenómeno conocido como presión osmótica la cual, como se muestra en la Ilustración 6, consiste en la fuerza ejercida del líquido sobre una superficie, esto quiere decir que el fluido está en constante movimiento hasta que la concentración del solvente es mucho mayor de un lado que del otro, por lo cual deja de existir una transferencia del agua con solución concentrada de contaminante al agua pura por medio de la membrana TFC. Esta tecnología muestra un rendimiento similar en las pruebas experimentales con respecto a otras tecnologías de tratamiento de agua, como por ejemplo la tecnología de coagulación y floculación, aunque una desventaja de esta tecnología es que la membrana se llega a dañar por el cloro libre y no se ha estudiado a gran profundidad cuál es su desempeño al entrar en contacto con otros contaminantes o solventes disueltos (Ferrer *et al*, 2016).

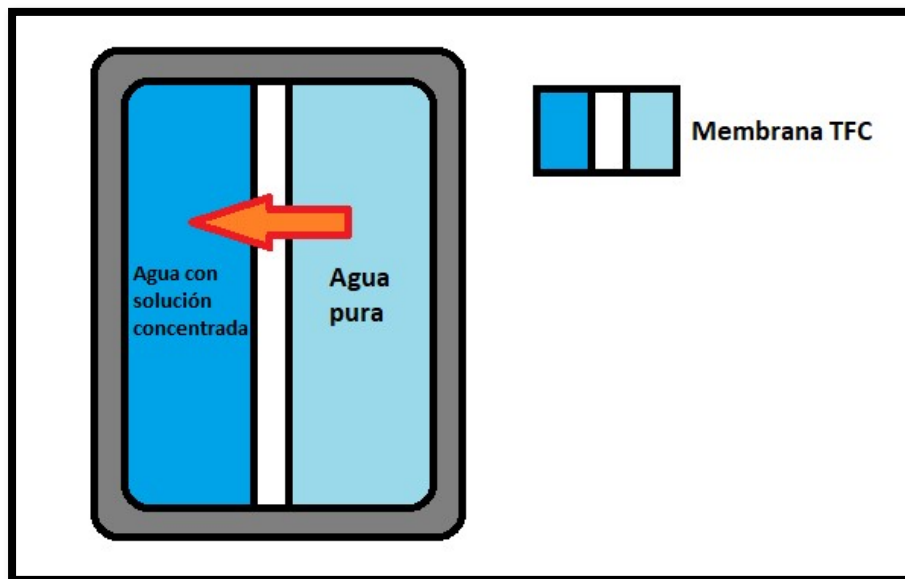


Ilustración 6. Proceso de osmosis inversa.

El costo de la tecnología ocupada para la osmosis inversa depende del tipo de sistema aplicado, ya que este puede rondar entre \$1,999.00 MXN para un sistema simple de purificación de agua de 5 litros hasta los \$72,999.00 MXN para un sistema Comercial SS 2200 1 Membrana 1.5 Gpm. Es importante mencionar que el costo también depende de otros factores y se debe considerar como un punto importante el costo por producción de agua y en el que entran puntos como costo energético (bombas de alta presión, bombas de dosificación y energía general), importe unitario de mano de obra (personal operativo y asesoría técnica), importe unitario de químicos, e importe del mantenimiento (Dévora-Isiordia et al, 2016).

3.3.4 Estudios de casos

A continuación, en la Tabla 5, se presentan algunos estudios de caso sobre estudios de remoción de As.

Tabla 5. Estudios de casos para remoción de arsénico.

Título de la experimentación y nombre de los autores.	Metodología de la experimentación	Resultado de la experimentación
<p>Eliminación de arsénico en aguas subterráneas mediante coagulación con sulfato férrico (III) y sulfato poliférrico: un estudio comparativo y mecanicista.</p> <p>(Jinli Cui, Chuanyong Jing, Dongsheng Che, Jianfeng Zhang y Shuxuan Duan, 2016).</p>	<p>Se tomaron 10 muestras de agua subterránea al azar que contenían arsénico.</p> <p>Tres de estas muestras con concentraciones comparables o superiores de 321, 578 y $1067 \frac{mg}{l}$, se seleccionaron para su estudio posterior donde pasaron por un tratamiento adicional, mientras que otra muestra de agua (la quinta muestra), fue ocupada para un estudio de eliminación de arsénico por medio de un sistema de filtración ocupándonos dos cubetas.</p> <p>El método de remoción consistió en procesos de oxidación, coagulación y filtración de las muestras que contenían el arsénico. El proceso de coagulación de arsénico se llevó a cabo en una cubeta, mientras que el proceso de filtración fue realizado en un sistema de dos cubetas. Esta experimentación consistió primeramente en adicionar $Ca(Cl)_2$, para que el arsénico de las muestras pasara de As(III) a As(V), de forma que se oxidara después de su recolección en el sitio. Posteriormente se le agregó coagulante de sal de hierro (sulfato férrico y sulfato</p>	<p>Para la determinación de arsénico se obtuvo por medio de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) junto con un espectrómetro de fluorescencia atómica de generación de hidruros.</p> <p>Los resultados arrojaron que mientras más fuera la dosis de $Ca(Cl)_2$, la oxidación sería mayor. Para una dosis de $5 \frac{mg}{l}$, el arsénico se oxidó un 90% a As(III) después de 5 minutos y después de 20 minutos se oxidó todo el As(III) de las muestras, comprobando así que el tiempo óptimo para la oxidación del arsénico es de 20 minutos.</p> <p>Por otra parte, el resultado de la eliminación de arsénico por medio de sulfato férrico (FS) y sulfato poliférrico (PFS) arrojaron que dependiendo de la dosis de coagulante y de la interacción entre el arsénico y el hierro la remoción se presenta entre el 95% para dosis de $0.12 \frac{g}{l}$ de FS y $0.10 \frac{g}{l}$ de PFS.</p>

	<p>poliférrico), en las muestras de 100 ml previamente oxidadas con el $Ca(Cl)_2$ y se agito durante 30 minutos en un rotador para que las muestras fueran filtradas por una membrana de 0.22 μm con el fin de agregar HCl y se analizara el arsénico total. Finalmente, en el proceso de filtración de dos cubetas, los fluidos pasaron por medio de una capa de arena que daría un tiempo menor de 90 minutos entre cada ciclo de filtrado.</p> <p>Al final los lodos obtenidos en este proceso se llevaron a un laboratorio donde se lavó con agua desionizada con conductividad menor a 100 $\mu S/cm$ con el fin de eliminar todos los componentes solubles y se liofilizó para un análisis posterior.</p>	
<p>Estudio de eliminación de arsénico con resinas de intercambio iónico en agua potable de Zimapán, Estado de Hidalgo, México.</p> <p>(Pérez F., Prieto F., Rojas A., Marmolejo Y., Salinas E. y Patiño F., 2006).</p>	<p>Se realizó un estudio en agua de pozo (específicamente en el pozo V de Zimapán, Hidalgo) que presentó una concentración promedio de arsénico total de $480 \pm 11 \frac{\mu g}{l}$.</p> <p>Se ocuparon tres intercambiadores iónicos (dos de resinas aniónicas básicas fuertes y una de resina aniónica débilmente básica) con el fin de remover el arsénico de la muestra de agua de pozo.</p> <p>El procedimiento consistió primeramente en un pretratamiento de los intercambiadores iónicos,</p>	<p>Los resultados arrojados durante la experimentación fueron que las resinas aniónicas retuvieron y redujeron los niveles de As(V), pasando de $480 \frac{\mu g}{l}$ a $25 \frac{\mu g}{l}$, mostrando un porcentaje de eficiencia diferente para cada una de estas resinas.</p>

	<p>activando cada uno con NaCl al 4% y con agitación constantemente por un tiempo aproximado de 20 minutos, para posteriormente lavarlos en ciclos de tres con agua desionizada.</p> <p>Posteriormente a las tres columnas con resina, se les hizo pasar las muestras de agua de pozo a temperatura ambiente y con un flujo de 2 a 3 $\frac{ml}{m}$, para que al final se recogieran muestras de 50 ml.</p> <p>Finalmente, los volúmenes de muestras fueron analizadas por un espectrofotómetro de absorción atómica marca Varian, modelo Spectr AA 880, con lámpara de cátodo hueco y las columnas con resinas fueron regeneradas con agua normal y a contraflujo.</p>	
<p>Aplicación de la tecnología de membranas en el tratamiento de algunos residuos líquidos altamente peligrosos.</p> <p>(Calvo-Brenes G., Mora-Molina J., Quesada-Kimsey J. y Quesada-Carvajal H., 2010).</p>	<p>Se probó el uso de membranas de osmosis inversa para el tratamiento de dos líquidos peligrosos, generados en el Laboratorio de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC).</p> <p>La tecnología de membranas de osmosis inversa tiene como objetivo el poder separar los contaminantes gracias a su tamaño molecular e iónico, reduciendo el volumen en el que se halla disuelto o suspendido esta especie contaminante.</p> <p>Estos líquidos peligrosos del CEQIATEC, fueron los</p>	<p>Se midieron los parámetros iniciales y finales de los dos líquidos tratados, con el fin de evaluar la eficiencia del tratamiento por medio de membrana de osmosis inversa. En el caso del líquido de DQO, los parámetros medidos fueron concentraciones de mercurio, plata y cromo, mientras que las concentraciones medidas para los desechos de AA fueron cromo, plomo, níquel, cadmio y cobre.</p> <p>Para todos los casos, los contaminantes fueron reducidos por debajo de la norma en el tratamiento de</p>

	<p>desechos provenientes de los análisis de demanda química de oxígeno (DQO) y también los provenientes de los análisis de metales por absorción atómica (AA).</p> <p>El procedimiento consistió primeramente en hacer un tratamiento preliminar (PRETRATAMIENTO), el cual tendría por objetivo eliminar los oxidantes fuertes, valores extremos de pH y especies que pudieran precipitarse en la membrana y así bloquearla. Posteriormente los dos líquidos resultantes fue pasado por la membrana de osmosis inversa obteniendo un concentrado junto con un permeado (solutos disueltos y fracción líquida), para finalmente obtener los desechos tratados.</p>	<p>filtrado por membrana de osmosis inversa, a excepción del níquel y el mercurio que fueron reducidos desde el pretratamiento.</p>
--	---	---

3.4 Destilación solar

Entre las soluciones más sustentables para la obtención de agua potable se encuentra la destilación solar, que es un proceso de purificación que utiliza la radiación solar para la obtención de agua destilada o libre de contaminantes, microorganismos o compuestos inorgánicos.

Los destiladores solares como se muestra en la Ilustración 7, funcionan como una caja de vidrio transparente con una base de algún tipo de material que pueda absorber la radiación solar (mejor conocido como colector), dicha base se llena con agua que contiene algunos contaminantes o diferentes componentes que la hacen no potable. Posteriormente, el colector aumenta su temperatura y va transfiriendo el calor al fluido, dando como resultado la evaporación empezando por su superficie. El producto de estas diferencias de temperatura (superficie del fluido caliente y cubierta de vidrio fría) ocasionan un flujo de convección natural de aire húmedo que se produce dentro del destilador y como resultado, la cubierta de vidrio inclinada condensa este vapor en agua destilada y gracias a la fuerza de gravedad la transporta hacia un pequeño canal recolector en la pared lateral, donde puede ser recolectada en recipientes para su posterior uso (Torchia y Cervantes, 2013).

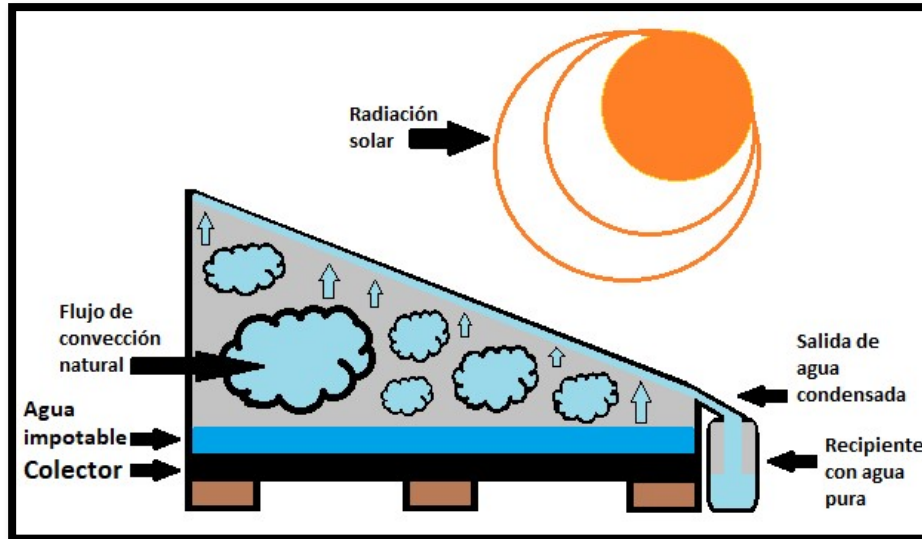


Ilustración 7. Proceso de destilación solar.

Este proceso se lleva a cabo con una gran variedad de destiladores solares, entre los más importantes se encuentran los siguientes (Pallante Rojas, 2015):

- **Destilador Solar de una sola vertiente**

Este modelo de destilador solar se muestra en la Ilustración 8, consta de una estructura muy simple y es el más utilizado a comparación de los demás modelos. Es una caja donde se tiene una cubierta inclinada de vidrio que pueda absorber la radiación solar. El sistema dentro del destilador consta de dos secciones. En la primera se tiene una charola o colector de aluminio o cualquier otro material que permita la transferencia de calor por medio de la energía acumulada dentro del destilador y que ayude a evaporar el agua impotable. La segunda sección consta de un fondo que permita retener el agua condensada en la superficie de la cubierta inclinada que por gravedad se desplaza a esa zona.

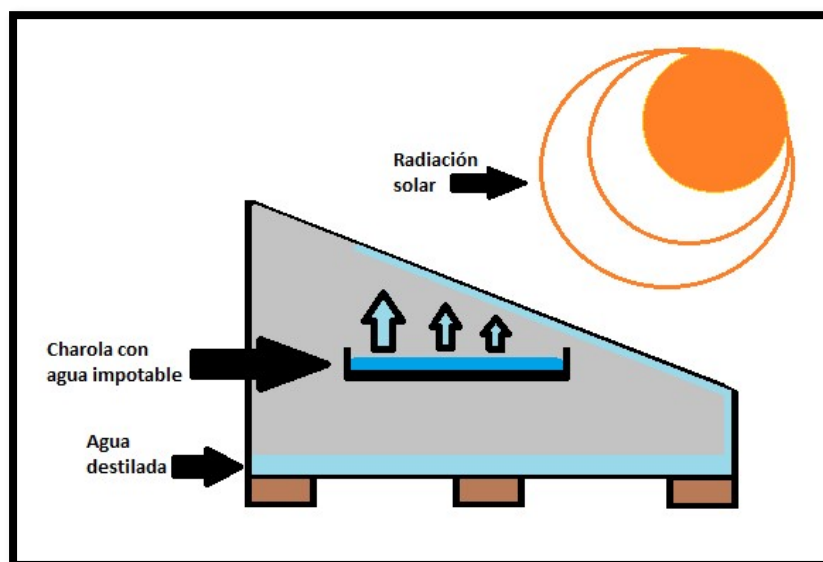


Ilustración 8. Destilador Solar de una sola vertiente.

- **Destilador Solar de dos vertientes**

Este modelo de destilador solar es parecido al anterior, ya que como se muestra en la Ilustración 9 consta de dos cubiertas inclinadas transparentes (diferente al modelo de una vertiente que consta de una cubierta), dando un aspecto de techo y que puedan absorber la radiación solar. Gracias a esta modificación, se obtendrá de manera más rápida el agua destilada, ya que será menos tiempo de espera por la caída de agua resultante de la fuerza de gravedad por estas dos superficies inclinadas.

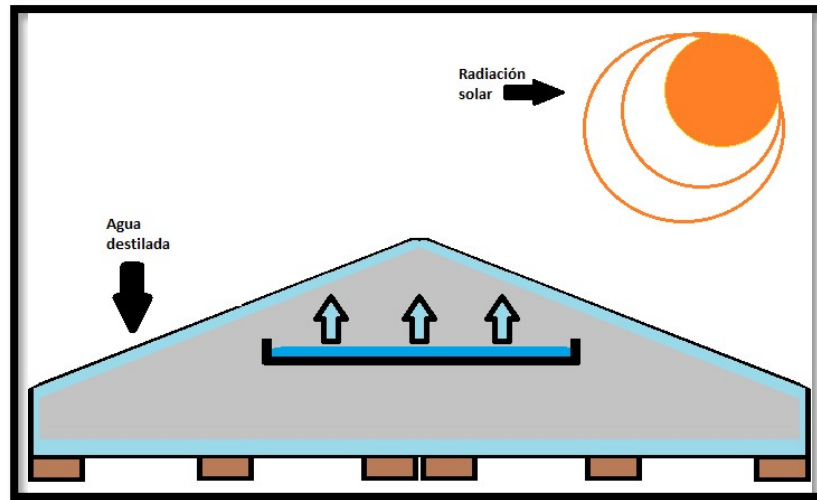


Ilustración 9. Destilador Solar de dos vertientes.

- **Destilador Solar tipo invernadero**

Este modelo de destilador solar cuenta con una mayor área superficial, tal como se muestra en la Ilustración 10 para colocar una cantidad más significativa de volumen y obtener más agua destilada. La configuración es similar al destilador de dos vertientes, pero no contiene una charola, por lo cual la base de este destilador debe de contener un material que permita una buena transferencia de calor para poder evaporar el fluido. El agua generada por la evaporación en las superficies inclinadas se recolecta gracias a los dos depósitos colocados en los extremos.

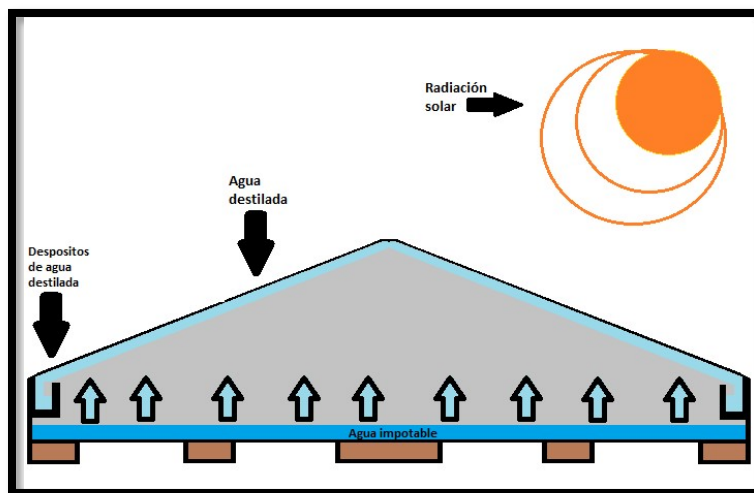


Ilustración 10. Destilador Solar tipo invernadero.

3.4.1 Estudios de casos

A continuación, en la Tabla 6, se presentan algunos estudios de caso sobre estudios de destilación solar.

Tabla 6. Estudios de casos para destilación solar.

Título de la experimentación y nombre de los autores.	Metodología de la experimentación	Resultado de la experimentación
<p>Diseño de un destilador de agua de mar utilizando energía termosolar.</p> <p>(Cuauhtémoc Pozos Vázquez, Víctor Daniel Acuña Díaz Juan Pablo Torres Cruz, 2018).</p>	<p>Elaboran un prototipo de destilador solar que consta de dos colectores planos con superficies reflectantes de espejo, un receptor de aluminio el cual contenía agua de mar, un termómetro y una salida de agua destilada. El prototipo fue fabricado con materiales reciclados y la experimentación se realizó en el Instituto de Estudios Superiores de Tamaulipas (IEST), Altamira, Tamaulipas, México.</p> <p>El prototipo se dejó operar en un periodo de 5 horas (12:00 a 17:00 horas) con una muestra inicial de 4 litros de agua de mar, en donde los rayos de luz fueron reflejados al receptor de aluminio por medio de los colectores tipo plano.</p> <p>En los primeros 40 minutos de la prueba, obtuvieron las primeras gotas de agua destilada y las temperaturas más altas en el destilador solar fueron de las 14:10 a las 16:10 horas, obteniendo temperaturas alrededor de los 70°C. Una vez alcanzado el estado continuo de operación se obtuvo un flujo volumétrico de 15 ml por cada hora de destilado, dando</p>	<p>Tras la experimentación de 5 horas se removieron las sales de la muestra de agua de mar, dando una efectividad del 99% en este prototipo de destilador solar.</p> <p>Los productos obtenidos, el agua de mar y el agua desmineralizada fueron analizados mediante la técnica de la norma NMX-AA-073-SCFI-2011 la cual establece la "DETERMINACIÓN DE CLORUROS TOTALES EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS". Los resultados de esta determinación demostraron que la calidad del agua tenía un 99% de remoción de sales, presentes en forma de iones y según la norma NOM-127-SSA1-1994, el agua obtenida se clasificaba como potable.</p>

	un total de aproximadamente 75 ml de agua destilada en toda la prueba.	
Desalinización de agua empleando un destilador solar tubular. (Suher Carolina Yabroudi, Carmen Cárdenas, Leonardo Aldana, José Núñez y Lenin H, 2011).	Elaboraron en el estado de Zulia en Venezuela, un destilador solar tubular (DST) con una canaleta en donde colocaron la muestra de agua a destilar, un tubo de vinilo transparente y una base de hierro para el destilador solar. Prepararon agua sintética con concentraciones de 3000, 10000 y 30000 $\frac{mg}{l}$ de cloruros y realizaron la experimentación para cada concentración en un horario de las 8:00 a las 17:00 horas por 60 días en los meses de octubre, noviembre, enero y marzo. Obteniendo las muestras a analizar cada hora desde las 8:00 hasta las 12:00 horas, posteriormente cada media hora desde las 12:30 hasta las 16:00 horas y finalmente la última muestra a las 17:00 horas. Por último, cada muestra destilada fue analizada por la metodología de APHA en el 2005.	Analizaron la temperatura, radiación solar, cloruros, salinidad, sólidos disueltos totales y el volumen de agua destilada. Encontraron variaciones en la temperatura y radiación solar. Los valores más altos de radiación solar fueron 513 $\frac{W}{m^2}$ registrados por las concentraciones de 10000 y 30000 $\frac{mg}{l}$ y esta se transmitió por el tubo de vinilo transparente. Se registraron puntos medios de remoción de 99.4%, con extremos de 99.8% y 98 % y los mayores porcentajes de remoción se registraron en los días más soleados los cuales fueron los días 9, 39 y 51. Así, el % de remoción promedio de las tres concentraciones ocupadas fue del 99.2%. Finalmente logran remover cloruros y sólidos disueltos totales de las muestras alcanzando una eficiencia del 99% en su remoción.

4 Desarrollo del proyecto

Las pruebas de destilación solar se realizaron dentro de las instalaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco, principalmente en la azotea del edificio 2P y la determinación analítica del arsénico (As) se realizó en el Laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

En la siguiente ilustración se muestra un diagrama de flujo con la metodología utilizada para la realización del presente proyecto de investigación sobre destilación solar para remoción de As en agua:

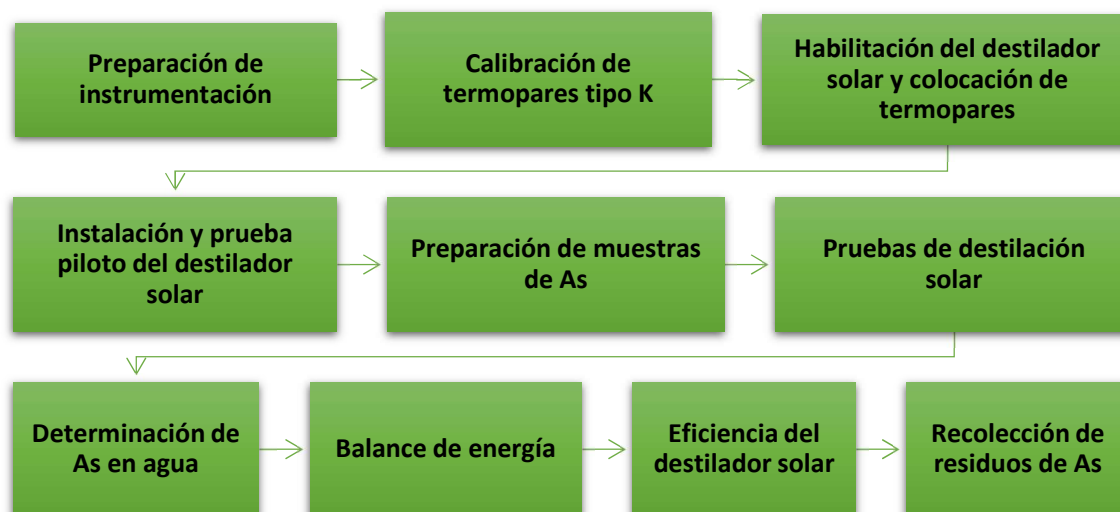


Ilustración 11. Metodología para el proyecto de remoción de arsénico en agua.

4.1 Preparación de instrumentación

La preparación de la instrumentación consistió en la conexión de los módulos ADAM 4000 y el registro de datos experimentales mediante una computadora y del software LabVIEW, así como el uso de termopares tipo K, los cuáles fueron previamente calibrados y de un piranómetro Epleey. A continuación, se muestra el desarrollo de la instrumentación empleada en el dispositivo.

- **Conexión de módulos ADAM 4000**

Los materiales e instrumentos que se ocuparon para la conexión de los módulos ADAM 4000 fueron:

- Módulos ADAM 4520, 4018+ y 4017.
- Computadora con software instalado LabVIEW y ADAM-4000 Utility.
- Cable puerto serial.
- Cables rojo y negro para conexiones.
- Fuente poder con conexión a la corriente eléctrica.

Para la realización de las mediciones de temperatura fueron necesarios ocupar los “Módulos ADAM 4000”, los cuales tienen como objetivo el acondicionar, adquirir y transmitir los datos físicos de la experimentación a datos digitales que se pueden registrar en la computadora. Los módulos ADAM que se ocuparon fueron los siguientes:

Módulo ADAM 4520: Este módulo tiene por objeto transmitir los datos por un puerto serial hasta la computadora que consta de los softwares necesarios para corroborar que están conectados de buena manera los módulos y los termopares tipo K, y por último para transmitir y registrar las temperaturas en LabVIEW.

Módulos ADAM 4018+: Estos módulos se conectan entre sí, generando una dirección hexadecimal que tiene por objeto poder conectar los termopares, cada módulo cuenta con ocho canales para conectar los termopares. Es importante mencionar que se necesitan estrictamente cinco módulos ADAM conectados, la razón es que la interface en LabVIEW está diseñada solamente para esta configuración.

Módulo ADAM 4017: Este módulo se ocupa especialmente para transmitir los datos analógicos del piranómetro (instrumento el cual mide la radiación solar) a la computadora y es el último que se conecta para la realización de las pruebas experimentales.

En la ilustración 12, se muestran las conexiones de cada uno de los módulos empleados.



Ilustración 12. Conexión de todos los módulos ADAM 4000.

4.2 Calibración de termopares tipo K

Después de conectar la fuente de poder junto con los siete módulos ADAM y de registrar estos mismos en el software “ADAM-4000 Utility”, se verificó el correcto funcionamiento de los termopares tipo K (sensores de temperatura fabricados de cromel-alumen), esto con la finalidad de seleccionar los mejores y posteriormente colocarlos en el destilador solar para medir las temperaturas experimentales.

Los materiales e instrumentos que se ocuparon para la calibración de los termopares tipo k fueron:

- Módulos ADAM conectados correctamente.
- Computadora con softwares instalados (ADAM-4000 Utility y LabView).
- Termopares tipo K.
- Recipiente.
- Hielo.
- Parrilla eléctrica.

Como primer punto de la calibración, se conectan 5 termopares tipo k en las entradas de cada uno de los cinco módulos ADAM 4018+, conectando 25 termopares tipo k en total.

Una vez conectados los termopares tipo K correctamente (tal como se muestra en la ilustración 13), se colocan los hielos en el recipiente, posteriormente, se introducen los termopares de tal modo que tengan contacto con el hielo y verificar que registren una temperatura de 0°C.

Posteriormente de este paso, se prendieron los módulos ADAM por medio de la fuente de poder junto con la computadora para registrar los módulos en el software "ADAM-4000 Utility" y se creó un archivo en formato Excel que se vinculó al otro software llamado "LabView".

Después de registrar los módulos ADAM y verificar que existían 25 canales para termopares tipo K, se prosiguió con la utilización del software "LabView" que antes de ocupar se tuvo que ajustar con los detalles necesarios, en los cuales se seleccionaron cinco módulos ADAM tipo 4018+, se vinculó el archivo en Excel previamente guardado para que se registraran todas las temperaturas de cada canal de termopar y se seleccionó un periodo de tiempo de un minuto para cada medición.

La calibración de los termopares tipo K empezó a las 12:00 horas y termino a las 13:10 horas del día (dando un total de 1 hora y 10 minutos de muestreo de las temperaturas). En esta hora y diez minutos el recipiente con los hielos se colocó sobre la parrilla a una temperatura constante, por lo cual el hielo empezó a derretirse y aumento la temperatura registrada en los canales.



Ilustración 13. Calibración de termopares ocupando módulos ADAM.

4.3 Habilitación del destilador solar y colocación de termopares

El destilador solar se habilitó y en él se realizó una prueba piloto con agua para verificar el buen funcionamiento y a su vez que no tuviera fugas de vapor ni de agua.

En la Ilustración 14, se muestra el destilador solar tipo caseta, el cual cuenta con una cubierta de vidrio inclinada 30° sobre la horizontal, cabe mencionar que dicha cubierta cuenta con reflectores internos en los laterales y en la parte posterior, en el interior tiene una charola de aluminio pintada de negro mate para absorber la radiación solar, la cual tiene una superficie aletada para incrementar la transferencia de calor hacia el fluido, a su vez la charola es colocada sobre una base de vidrio de 6 mm en donde se encuentran canaletas de vidrio de 3 mm unidas entre la charola y la base de vidrio, con una inclinación aproximadamente de 5° , lo que permite que el agua destilada se deslice hacia la parte inferior para su posterior recolección



Ilustración 14. Destilador solar tipo caseta con reflectores internos.

Los materiales e instrumentos empleados para la habilitación del destilador solar y su respectiva instrumentación fueron:

- Destilador solar tipo caseta aletado, con reflectores internos.
- Termopares tipo K.
- Piranómetro
- Módulos ADAM 4000
- Computadora (con el software "LabView").
- Silicón multiusos.
- Cinta adhesiva o masking tape.

Para la habilitación del destilador solar, se colocaron termopares tipo K previamente calibrados como se ve en la ilustración 15 y 16, con el objetivo de conocer las temperaturas en diferentes

partes del destilador solar tales como: charola fluido, aletas y cubierta de vidrio. Se colocaron en total 17 termopares, los cuales fueron distribuidos de la siguiente manera:

Tabla 7. Distribución de termopares en el destilador solar.

Numero de módulo ADAM	Número de canal	Zona de colocación	Abreviación
2	1	Charola punto 1	TCH1
	2	Fluido punto 1	TF1
	3	Charola punto 2	TCH2
	4	Fluido punto 2	TF2
	5	Charola punto 3	TCH3
3	9	Aleta punto 1	TA1
	10	Aleta punto 2	TA2
4	17	Vidrio posterior superior	TVP-S
	18	Vidrio lado derecho superior	TVLD-S
	19	Vidrio inclinado superior	TVI-S
	20	Vidrio lado izquierdo superior	TVLI-S
	21	Flujo de aire externo	T_{∞}
5	25	Vidrio posterior interno	TVP-I
	26	Vidrio lado derecho interno	TVLD-I
	27	Vidrio inclinado interno	TVI-I
	28	Vidrio lado izquierdo interno	TVLI-I
	29	Flujo de aire interno	TA-I



Ilustración 15. Termopares colocados en la cubierta.

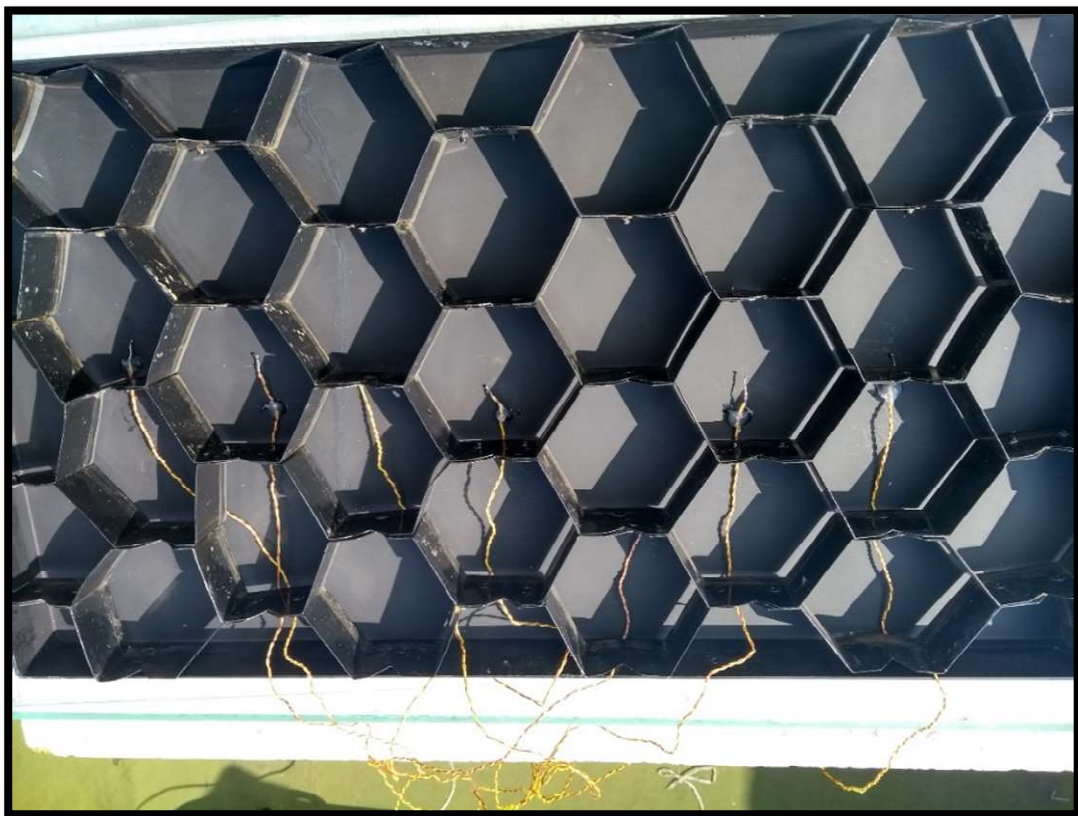


Ilustración 16. Termopares colocados en la charola y aletas.

4.4 Instalación y prueba piloto del destilador solar

El destilador se niveló con la finalidad de que no tuviera zonas con exceso de agua en la charola y la transferencia de calor fuera igual en todo el sistema. Se realizó una prueba piloto, tal como se muestra en la ilustración 17 con 2 litros de agua de la llave el día 27 de septiembre del 2019 en donde se dejó operando al destilador por un periodo de tiempo de tres horas (desde las 11 hasta las 14 horas), con el objetivo de observar si el destilador presentaba fugas u otro problema que impidiera continuar con la experimentación los días siguientes para la prueba de destilación del arsénico.



Ilustración 17. Destilador solar y equipo utilizado durante la prueba piloto.

4.5 Preparación de muestras de As

Para este proyecto se prepararon cuatro soluciones de arsénico (As), variando su concentración, las cuales fueron de 0.016, 0.05, 0.33, 0.5 y 0.0283 mg/l, para las cuales se preparó una solución concentrada de 1 mg/l de As a partir de arsenato de sodio (Ilustración 18), para posteriormente hacer disoluciones y llegar a las concentraciones antes mencionadas.

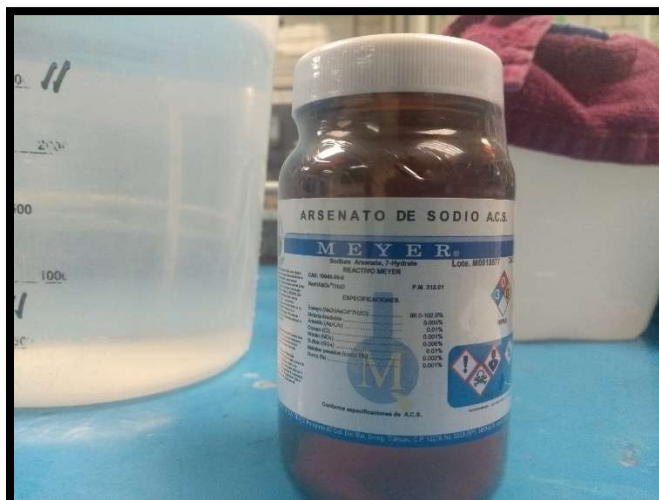


Ilustración 18. Compuesto de Arsenato de sodio (Na_2HAsO_4).

- **Solución concentrada de As.**

Para la elaboración de la solución concentrada (1 mg/l de As) se necesitó saber cuántos gramos o miligramos se tenían que disolver en 2.7 litros de agua desionizada (litros necesarios para la preparación de cada concentración). Los cálculos necesarios fueron los siguientes:

Compuesto: Na_2HAsO_4

Masa atómica:

Na= 22.98 x 2= 45.96 g/mol

H= 1 g/mol

As= 74.92 g/mol

O= 15.99 x 4= 63.96 g/mol

Na_2HAsO_4 = 185.84 g/mol = **186 g/mol**

186 g Na_2HAsO_4 – 75 g As

X g Na_2HAsO_4 – 0.001 g As

X = 0.00248 g/l * (2.7 litros necesarios para la preparación de cada concentración)

X= 0.0067 g Na_2HAsO_4 en 2.7 litros.

Los 0.0067 gramos de Na_2HAsO_4 fueron pesados en una balanza analítica (ilustración 19) y se colocaron en 3 litros de agua desionizada en un vaso de precipitado y la solución se dejó 5 minutos en agitación constante.



Ilustración 19. Balanza analítica "OHAUS" ocupada en la experimentación.

Después del periodo de agitación de la solución concentrada de As, se colocó en un bidón de 4 litros etiquetado con el fin de poderlo transportar de mejor manera y evitar accidentes (ilustración 20). Es importante mencionar que la solución concentrada tras cada uso se colocó en un refrigerador para que se mantuviera una temperatura constante.

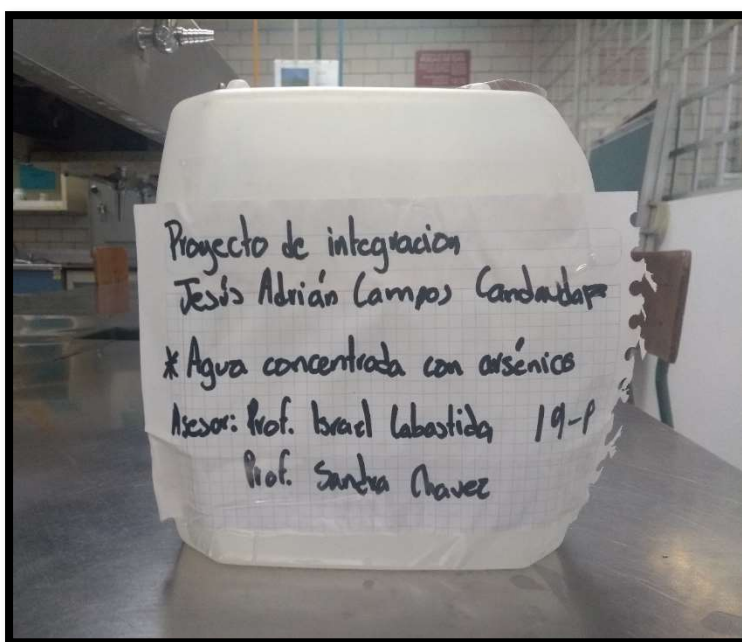


Ilustración 20. Bidón etiquetado con solución concentrada de As.

Una vez determinada la masa atómica del compuesto Na_2HAsO_4 y de obtener los gramos para diluir en 2.7 litros de agua desionizada, se tuvo que aplicar la fórmula de cálculo de dilución ($C_1V_1 = C_2V_2$) para saber cuántos mililitros de solución concentrada se necesitaban para una cantidad de agua desionizada.

$$C_i V_i = C_f V_f$$

Donde:

C_i = Concentración inicial.

V_i = Volumen inicial.

C_f = Concentración final.

V_f = Volumen final.

Por ejemplo:

Se preparó la primera disolución a partir de la solución concentrada de As (1 mg/l) realizando los siguientes cálculos:

$$(1 \text{ mg/l}) * (X \text{ mg}) = (0.016 \text{ mg/l}) * (3000 \text{ ml})$$

X= 48 ml de solución concentrada de As y 2952 ml de agua desionizada.

Este mismo procedimiento se realizó para la preparación del resto de las disoluciones.

4.6 Pruebas de destilación solar

Para la realización de las pruebas de destilación solar para remoción de arsénico (As), se ocuparon exactamente los mismos materiales e instrumentos (tal como se muestra en la ilustración 21) que en la prueba piloto realizada el 27 de septiembre del 2019, la única variación que se tuvo fue en las muestras que se colocarían en la charola, las cuales fueron tres litros de cada una de las disoluciones con concentraciones conocidas de As (0.016, 0.05, 0.33, 0.5 y 0.0283 mg/l de As) y cada una de ellas sería colocada por un periodo de siete horas (de las 10 a las 17 horas), obteniendo datos de temperatura y radiación solar cada 10 minutos mediante el software "LabView" (tablas de apéndice A.1 a A.5), junto con el volumen de cada una de las muestras de destilado después de una hora tal como se muestran en la ilustración 22 (tablas de apéndice A.6 y A.7) y el volumen total de destilado de cada prueba experimental.

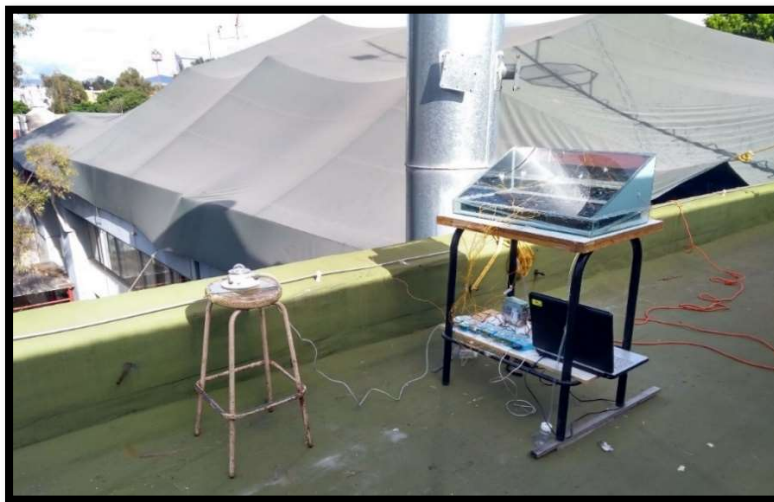


Ilustración 21. Destilador solar y equipo utilizado durante las cinco pruebas.



Ilustración 22. Muestras obtenidas durante las cinco pruebas cada hora.

Es importante mencionar que, después de la destilación solar los residuos de cada prueba fueron depositados en un bidón de 20 litros etiquetado adecuadamente (ilustración 23) y este mismo se colocó en un sitio aislado y dentro de un refrigerador para evitar cualquier problema o accidente.

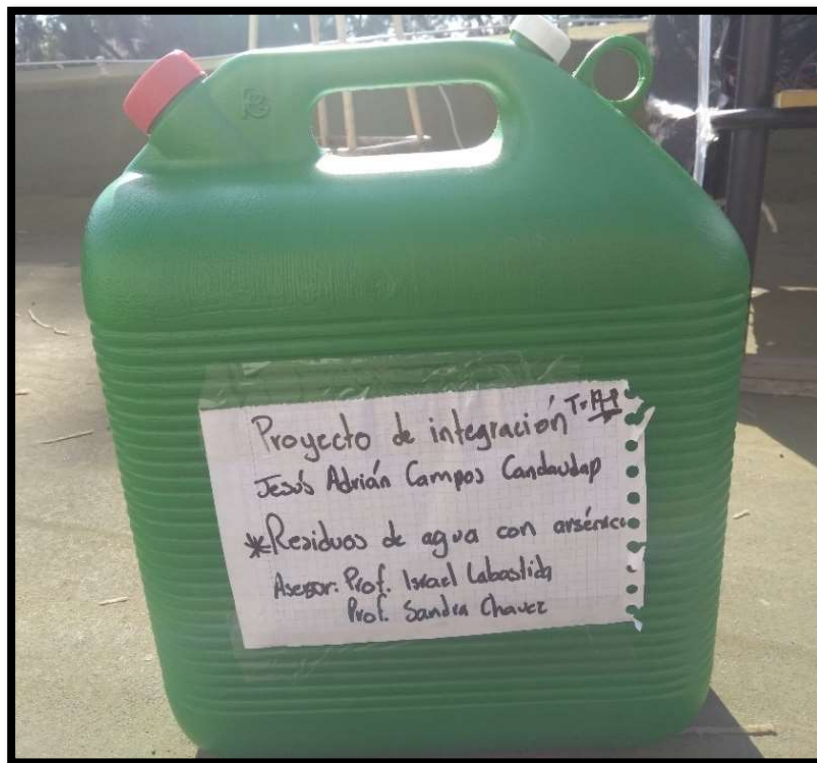


Ilustración 23. Bidón con residuos de agua con arsénico.

4.7 Determinación de As en agua

Posteriormente se determinaron las concentraciones finales de As en las soluciones destiladas de cada una de las pruebas experimentales. Cabe mencionar que, en un objetivo específico, el As sería determinado por generación de hidruros y en esta ocasión las mediciones se realizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer AAnalyst 100 (ilustración 25) con sistema de inyección en flujo continuo (FIAS), el cual tiene un rango de medición de 2 ppb a 10 ppb (0.002 mg/l a 0.01 mg/l), tal como se muestra en la ilustración 24. Esta determinación se realizó en el laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

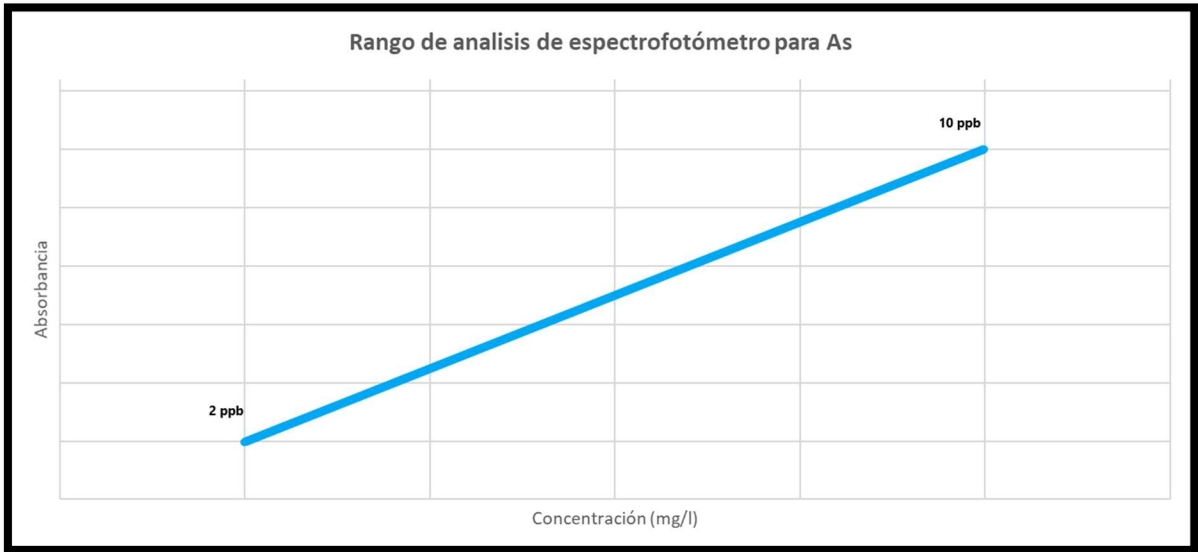


Ilustración 24. Rango del espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer AAnalyst 100 con sistema de inyección en flujo continuo (FIAS) para As.



Ilustración 25. Espectrofotómetro Perkin Elmer AAnalyst 100 con sistema de inyección en flujo continuo (FIAS).

4.8 Balance de energía

El balance de energía a desarrollar en el destilador solar fue de forma interna, donde se consideró la diferencia o el cambio del calor existente entre la superficie del agua y la cubierta de vidrio inclinado. La transferencia de calor que ocurre en el interior es por convección, evaporación y radiación en la cual se involucra el movimiento del fluido dentro del destilador solar (Elango *et al*, 2015).

En este análisis se tomó en cuenta que la saturación de las presiones de vapor a temperatura del agua y superficie interna de la cubierta de vidrio se evalúa por medio de las siguientes ecuaciones:

$$P_w = \exp \left[25.317 - \left(\frac{5144}{T_w + 273} \right) \right] \dots\dots\dots \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

P_w = Presión de vapor parcial a temperatura de la superficie del agua (N/m^2).

T_w = Temperatura inicial del agua ($^{\circ}C$).

$$P_{gi} = \exp \left[25.317 - \left(\frac{5144}{T_{gi} + 273} \right) \right] \dots\dots\dots \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

P_{gi} = Presión de vapor parcial a temperatura de la superficie interna del vidrio (N/m^2).

T_{gi} = Temperatura inicial de la cubierta de vidrio ($^{\circ}C$).

La transferencia de calor por convección entre la masa de agua y la superficie interna de la cubierta de vidrio está dada mediante la siguiente ecuación.

$$h_{c,w-gi} = 0.884 \times \left[(T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})(T_w - 273.15)}{268.9 \times 10^3 - P_w} \right]^{1/3} \dots\dots\dots \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

$h_{c,w-gi}$ = Coeficiente de transferencia de calor por convección del agua hacia el vidrio inclinado (W/m^2K).

T_w = Temperatura del agua ($^{\circ}C$).

T_{gi} = Temperatura interna de la cubierta de vidrio ($^{\circ}C$).

P_w = Presión de vapor parcial a temperatura de la superficie del agua (N/m^2).

P_{gi} = Presión de vapor parcial a temperatura de la superficie interna del vidrio (N/m^2).

Haciendo uso del modelo presentado por Dunkle (1961), el cual es el más popular para poder evaluar el coeficiente de transferencia de calor, dicho modelo acepta correlaciones empíricas para poder obtener el rendimiento del destilador solar a evaluar. Para este modelo es importante tener en cuenta algunos puntos como:

1. Se desarrolló para una convección libre de aire sin evaporación.
2. Las propiedades termofísicas del aire húmedo se toman para una temperatura del agua igual a 50°C.
3. La diferencia de temperatura entre la evaporación y la condensación de la superficie es considerada de 17°C.
4. Las superficies de evaporación y de condensación son consideradas paralelas.

Dunkle (1961), propone la siguiente ecuación para la determinación del coeficiente de evaporación:

$$h_{e,w-g} = 0.0163 \times h_{c,w-gi} \left[\frac{P_w - P_{gi}}{T_w - T_{gi}} \right] \dots\dots\dots \text{(Ecuación 4)}$$

Donde:

$h_{e,w-g}$ = Coeficiente de transferencia de calor por evaporación del agua hacia el vidrio inclinado (W/m^2K).

4.9 Eficiencia del destilador solar

Después de aplicar el modelo presentado por Dunkle (1961), se ocupó la ecuación de la eficiencia térmica instantánea presentada por Elango (2015). Esta eficiencia térmica instantánea en el destilador solar es el porcentaje de rendimiento energético que se presentó en el sistema durante la experimentación en términos de las temperaturas registradas en los vidrios y el agua.

Dicha ecuación de eficiencia térmica instantánea ocupa la diferencia de temperaturas entre la superficie del agua y la superficie del vidrio inclinado, junto con el modelo de Dunkle (1961) y la intensidad de radiación solar sobre cubierta de vidrio inclinada.

La ecuación por la cual se obtiene la eficiencia del destilador solar es la siguiente:

$$\eta_i = \frac{h_{e,w-g} (T_w - T_g)}{I(t)_s}$$

Donde:

η_i = Eficiencia térmica instantánea.

4.10 Recolección de residuos de As

Los residuos de As que se generaron en las cinco pruebas fueron almacenados en un bidón de 20 litros etiquetado (ilustración 26), para ser tratados en un futuro con algún método fisicoquímico o posiblemente iniciar un nuevo proyecto de integración donde se tenga como objetivo dar tratamiento o uso a esta agua contaminada con As.

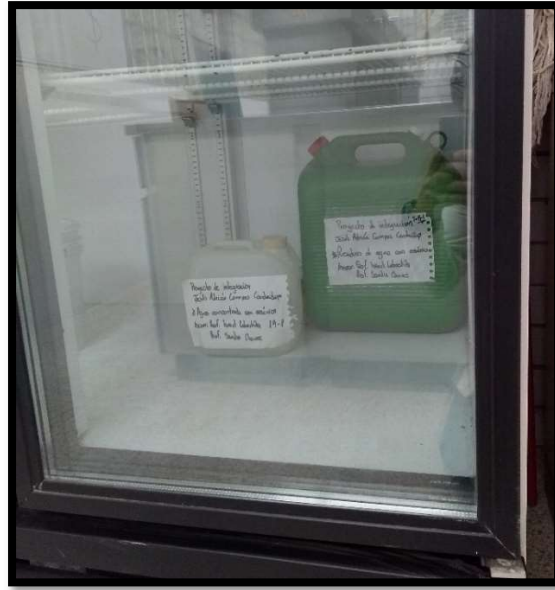


Ilustración 26. Residuos recolectados después de las cinco pruebas.

5 Resultados

5.1 Comportamiento de termopares tipo K durante la calibración

Los resultados arrojaron curvas con crecimiento exponencial de cada uno y el único canal de termopar que no cumplió con este requisito fue el numero 20 por lo cual tuvo que ser descartado tal y como se muestra en la ilustración 27.

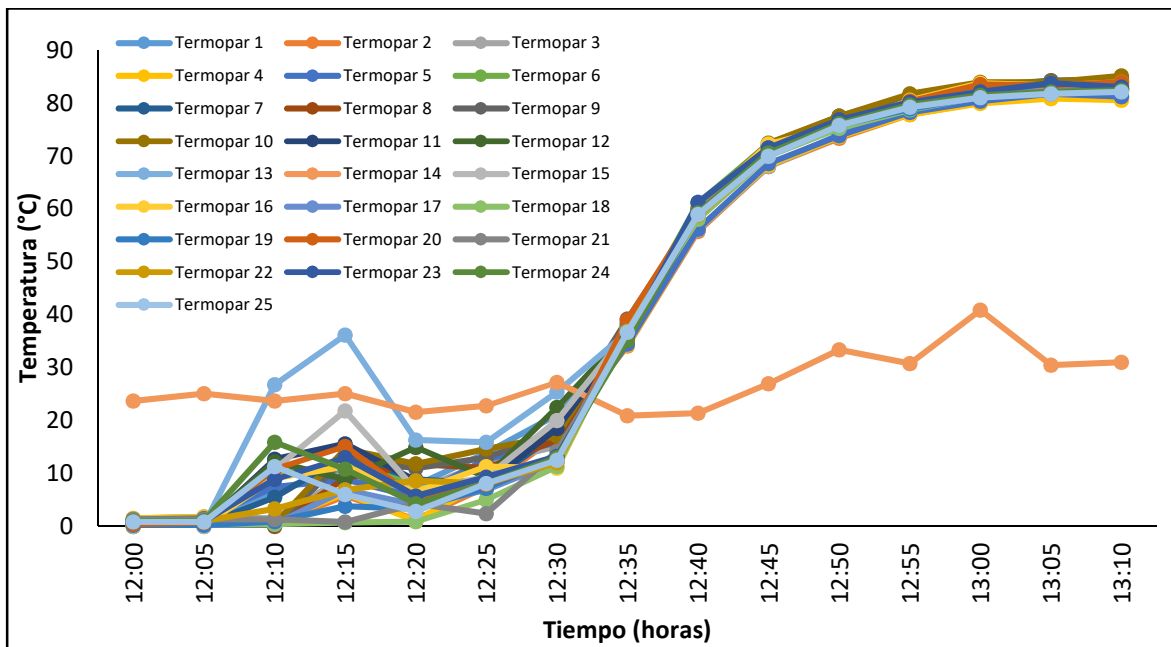


Ilustración 27. Calibración de termopares tipo K.

Es importante mencionar que se registraron temperaturas de 0 °C hasta arriba de los 80°C gracias al calentamiento con la parrilla y todos esos datos fueron representados en la gráfica anterior, pero en los primeros 20 minutos todos los puntos son inestables, debido a que no se tuvo un mezclado constante en el agua y la transferencia de calor fue distinta en varios puntos donde los termopares estaban colocados, pero posterior a ese error las temperaturas de todos los termopares (menos el 20) se muestran exponenciales, comprobando que 24 de los 25 termopares funcionan de forma correcta.

5.2 Comportamiento térmico del destilador solar

Prueba piloto:

A continuación, en la ilustración 28 se muestran las temperaturas registradas cada 10 minutos (desde las 11:00 hasta las 14:00 horas) de las aletas, la charola, el fluido y la ambiente para las cinco pruebas, junto con la radiación solar de la zona experimental.

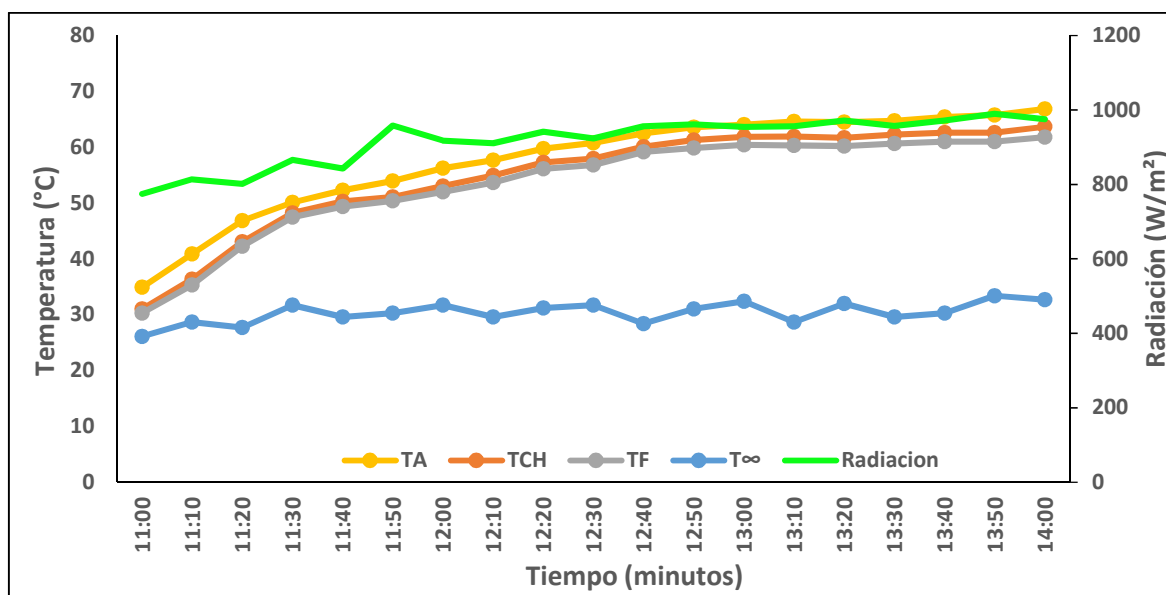


Ilustración 28. Temperaturas promedio registradas durante la prueba piloto.

Se puede observar que las temperaturas dentro del destilador solar mantienen una tendencia constante y exponencial, desde que empezó la prueba (11 horas) hasta que terminó (14 horas), por lo cual se puede exponer que el destilador solar, junto con los equipos funcionaron de manera correcta, por lo cual el sistema se mantuvo aislado y no presentó errores o fugas. Por último, observamos que las temperaturas promedio registradas de las aletas, charola, fluido y ambiente, junto con la radiación, y en ella se observan que la temperatura de las aletas y de la charola son las que mantuvieron una temperatura más alta que las demás y la radiación mantiene una temperatura constante. Se llega a la conclusión de que el destilador solar y la instrumentación necesaria operan en óptimas condiciones para las pruebas de destilación de arsénico.

Pruebas de destilación:

A continuación de la ilustración 29 a la 33, se muestran las temperaturas registradas cada hora (desde las 10:00 hasta las 17:00 horas) de las aletas, la charola, el fluido, el vidrio inclinado y el ambiente para las cinco pruebas, junto con la radiación solar de la zona experimental. En las tablas del apéndice A.1 al A.5 fueron colocados los datos correspondientes para cada hora.

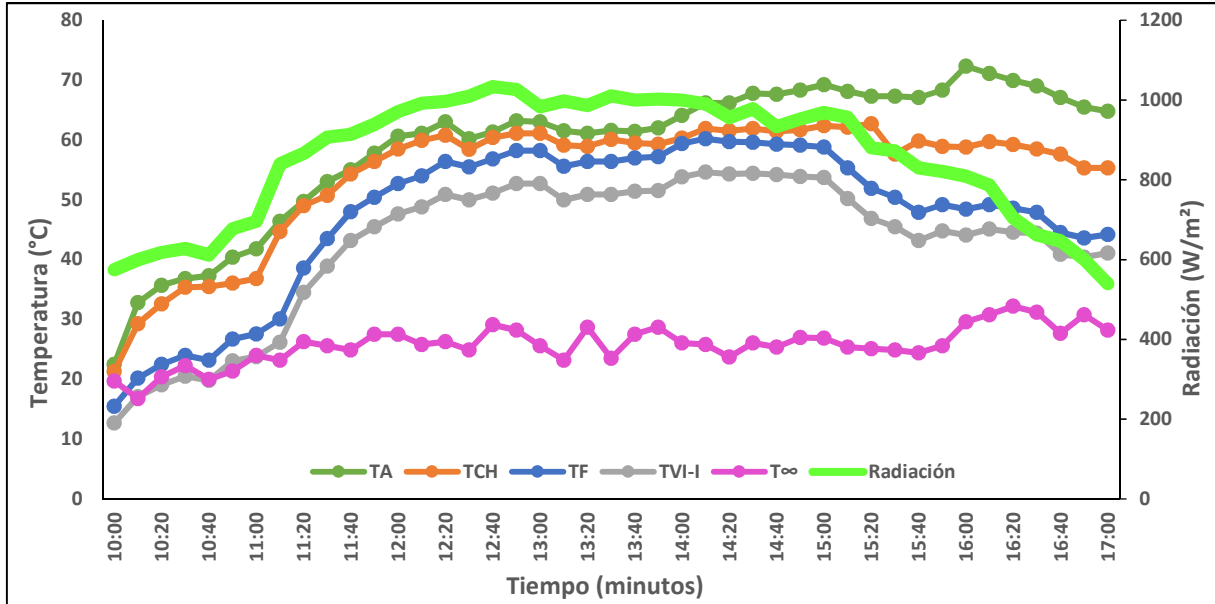


Ilustración 29. Temperaturas registradas en prueba uno.

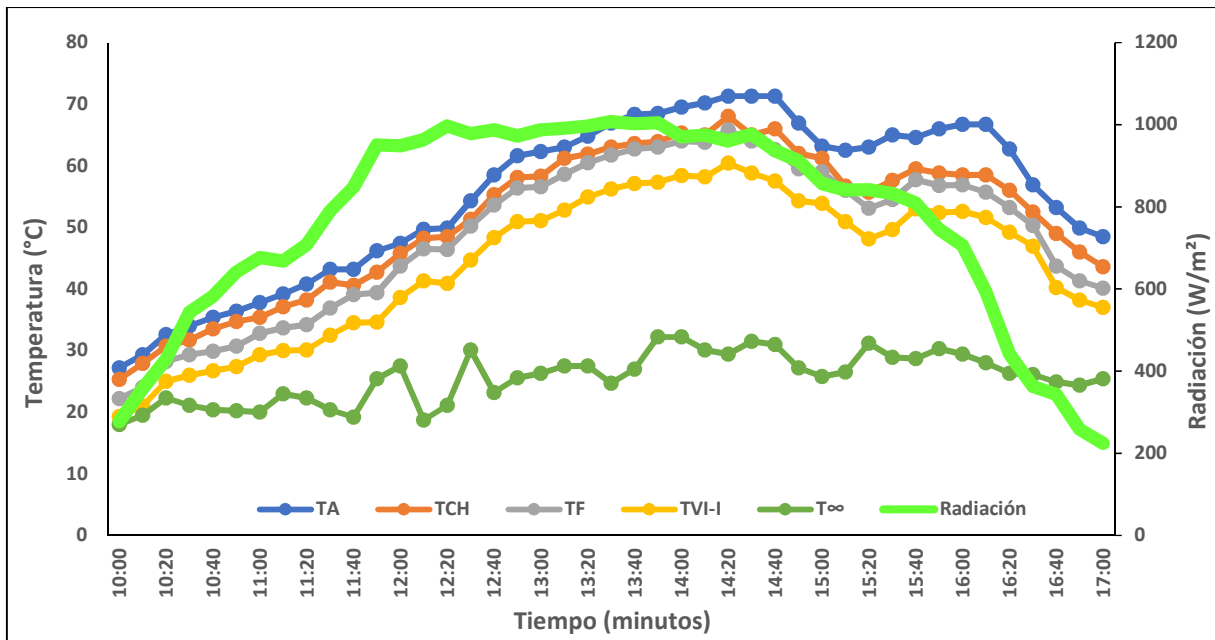


Ilustración 30. Temperaturas registradas en prueba dos.

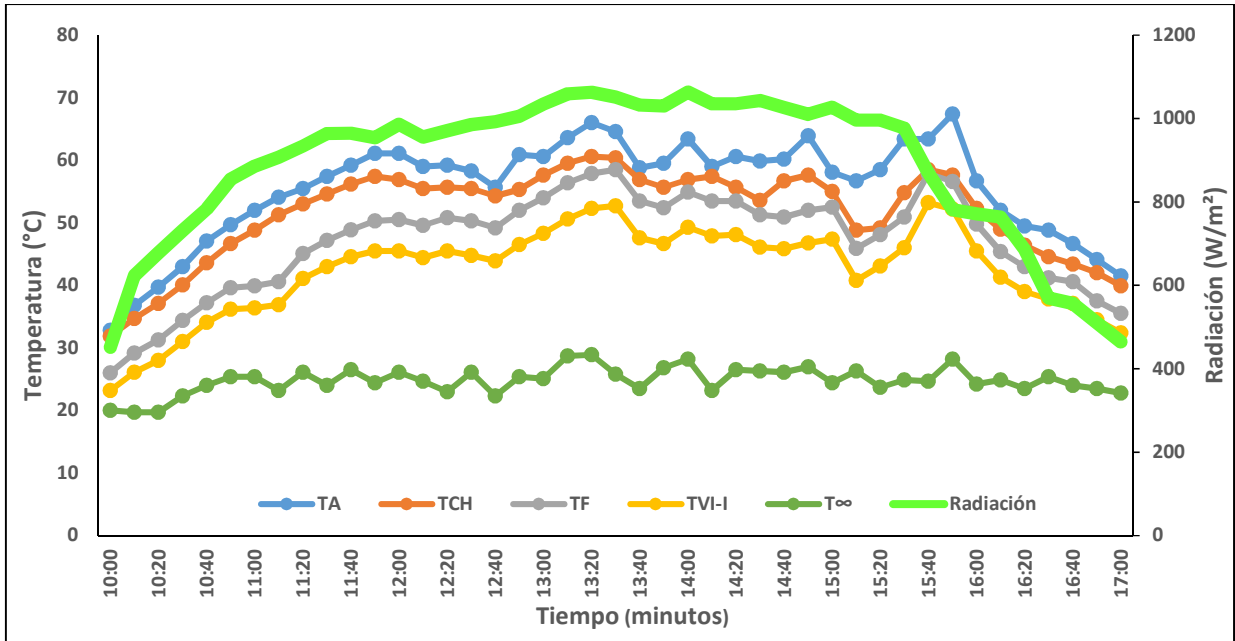


Ilustración 31. Temperaturas registradas en prueba tres.

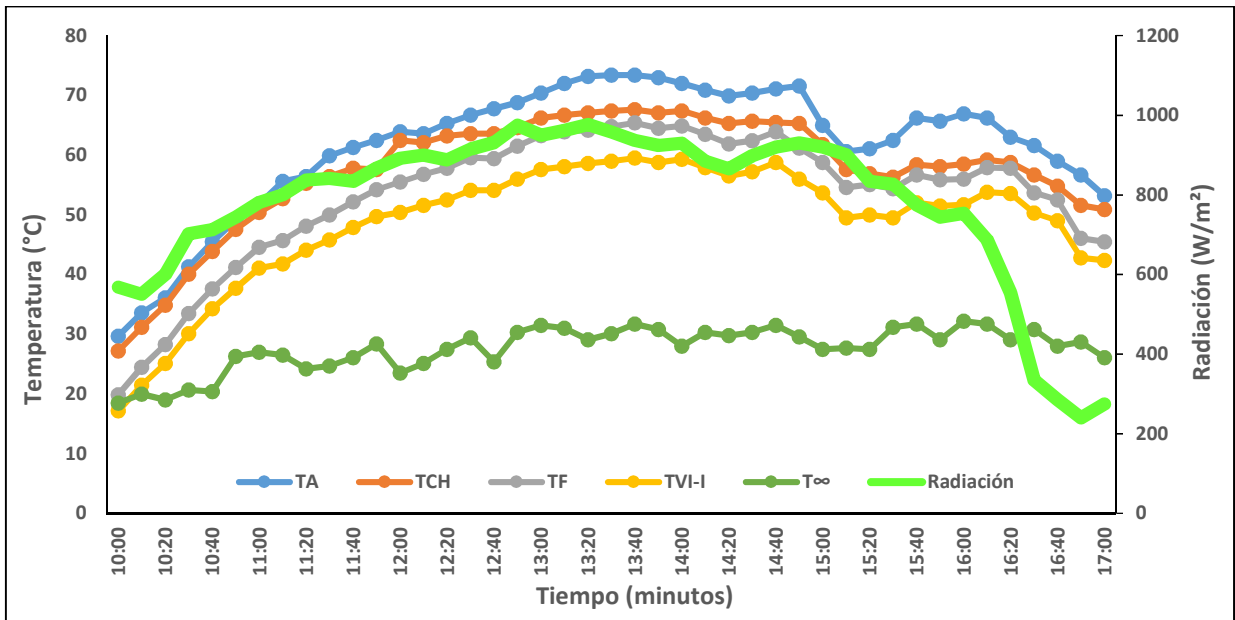


Ilustración 32. Temperaturas registradas en prueba cuatro.

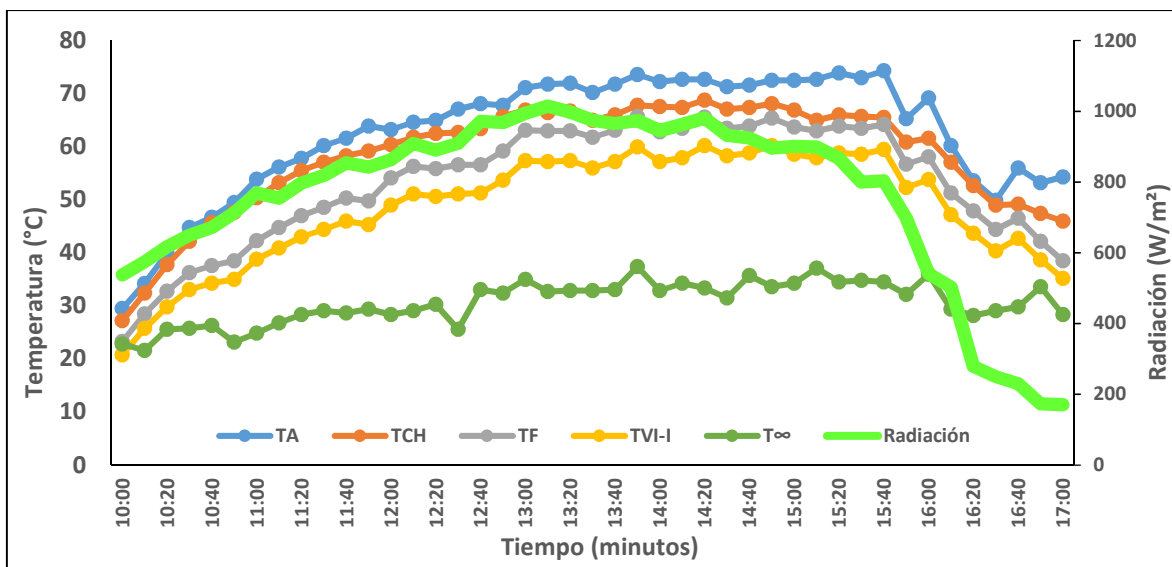


Ilustración 33. Temperaturas registradas en prueba cinco.

En las ilustraciones anteriores (29 a 33), se observa que en cada una de las pruebas existe un comportamiento similar, ya que las temperaturas más altas registradas fueron en las aletas y la charola, esto se debe a que la radiación solar se acumulaba en éstas, gracias al tipo de material y era donde se empezaba la transferencia de calor en las muestras de agua con arsénico. Por otro lado, la radiación solar registrada por el piranómetro se mantiene exponencial y posterior a las 15 horas empieza a decrecer de manera constante hasta las 17 horas.

5.3 Volúmenes de agua destilada

A continuación, se muestran los resultados el volumen total de destilado de cada prueba experimental (que se observan en la tabla 8). En las tablas del apéndice A.6 y A.7 fueron colocados los datos correspondientes para los volúmenes de agua destilada cada hora y el volumen total de agua destilada durante el proyecto.

Tabla 8. Volumen total de destilado en cada una de las pruebas.

Prueba de destilación solar	Día de realización	Numero de muestras obtenidas	Volumen de destilado total (litros)
Primera disolución con arsénico (0.016 mg/l)	2 de octubre de 2019	7	0.9
Segunda disolución con arsénico (0.05 mg/l)	4 de octubre de 2019	6	0.8
Tercera disolución con arsénico (0.33 mg/l)	5 de octubre de 2019	6	0.5
Cuarta disolución con arsénico (0.5 mg/l)	9 de octubre de 2019	6	0.6
Quinta disolución con arsénico (0.0283 mg/l)	14 de octubre de 2019	7	0.6

A continuación, en la ilustración 34 se muestran los litros de agua destilada obtenidos en cada una de las pruebas, teniendo en cuenta que el volumen original era de tres litros, y cabe resaltar que el volumen final obtenido en las cinco pruebas fue de 3.5 litros.

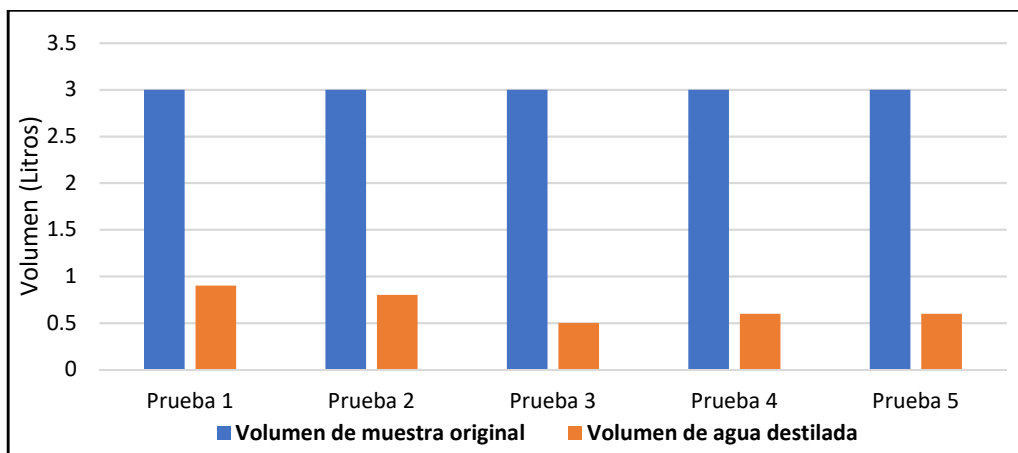


Ilustración 34. Volumen de agua destilada obtenida durante las siete horas de cada una de las pruebas.

5.4 Determinación de As en muestras de agua

Los resultados obtenidos después de multiplicar los factores de dilución, junto con el promedio de muestreo correspondiente para cada una de las muestras se especifican en la tabla 9:

Tabla 9. Concentración final de arsénico de cada una de las muestras.

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Muestra original	19.5 ppb de As = 0.0195 mg/l	40.9 ppb de As = 0.0409 mg/l	335.6 ppb de As = 0.3356 mg/l	538.2 ppb de As = 0.5382 mg/l	30.9 ppb de As = 0.0309 mg/l
Muestra 10:00 a 11:00	No se obtuvo muestra	No se obtuvo muestra	No se obtuvo muestra	No se obtuvo muestra	No se obtuvo muestra
Muestra 11:00 a 12:00	Menor a 2 ppb de As	No se obtuvo muestra	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As
Muestra 12:00 a 13:00	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As
Muestra 13:00 a 14:00	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As
Muestra 14:00 a	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As

15:00					
Muestra 15:00 a 16:00	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As
Muestra 16:00 a 17:00	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As
Muestra 17:00	Menor a 2 ppb de As	Menor a 2 ppb de As	No se obtuvo muestra	No se obtuvo muestra	Menor a 2 ppb de As

Cada uno de los resultados analizados señalan que las únicas muestras que presentaron As fueron las muestras originales, mientras que las muestras obtenidas tras la operación de destilado mostraron una concentración menor a 2 ppb de As (0.002 mg/l), significando que dicha muestra no entraba dentro del rango de análisis del espectrofotómetro Perkin Elmer AAnalyst 100.

A continuación, se muestra la tabla 10 con los resultados de las concentraciones teóricas, junto con las concentraciones prácticas de cada una de las muestras originales de las pruebas experimentales, no se consideraron diferencias significativas entre ambos resultados:

Tabla 10. Concentraciones teóricas y prácticas de muestras originales.

Concentración teórica de muestra original (mg/l)	Concentración practica de muestra original (mg/l)
0.016	0.019
0.0283	0.031
0.050	0.041
0.33	0.336
0.5	0.538

5.5 Eficiencia térmica del destilador solar

A continuación, se muestran las eficiencias del destilador solar por medio de sus temperaturas y obtenidas por medio del modelo presentado por Dunkle (1961) para cada hora (desde las 10:00 hasta las 17:00 horas) en las cinco pruebas. En la tabla del apéndice A.8 se colocaron los datos correspondientes para cada hora.

Cabe resaltar que se obtuvo un promedio de eficiencia para cada prueba por medio de las siete horas de experimentación:

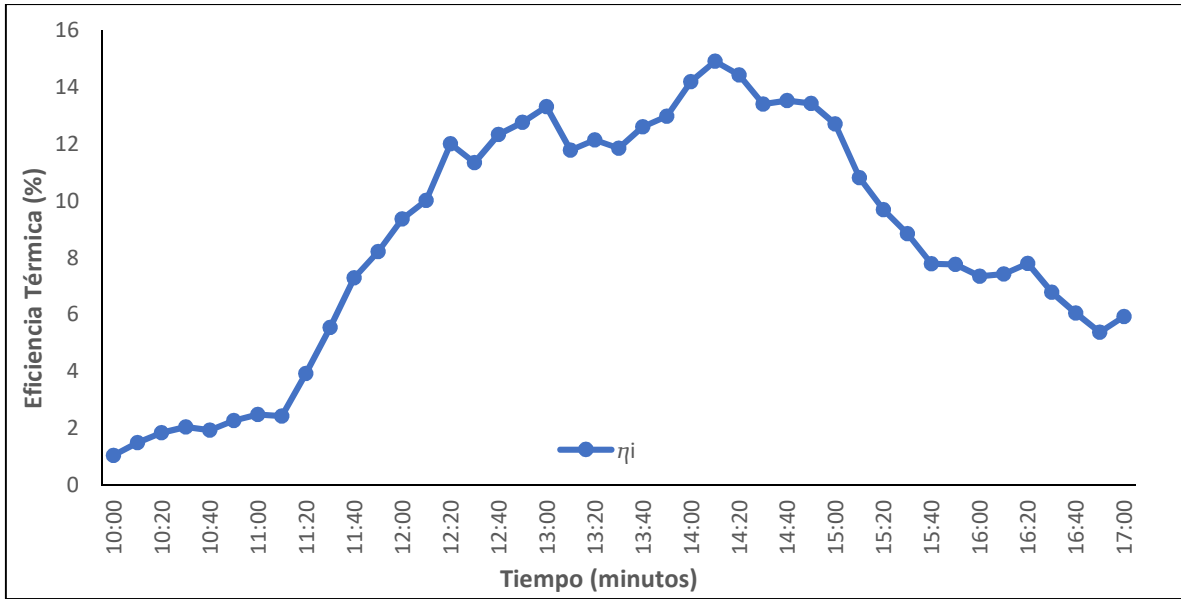


Ilustración 35. Eficiencias del destilador solar en la primera prueba.

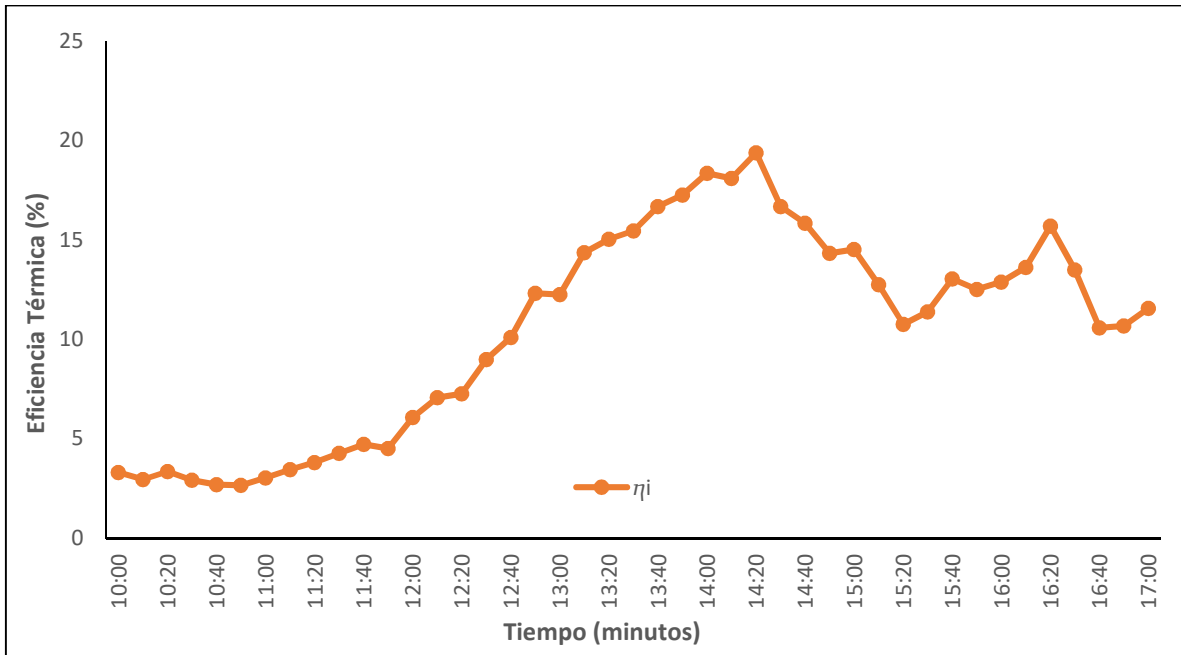


Ilustración 36. Eficiencias del destilador solar en la segunda prueba.

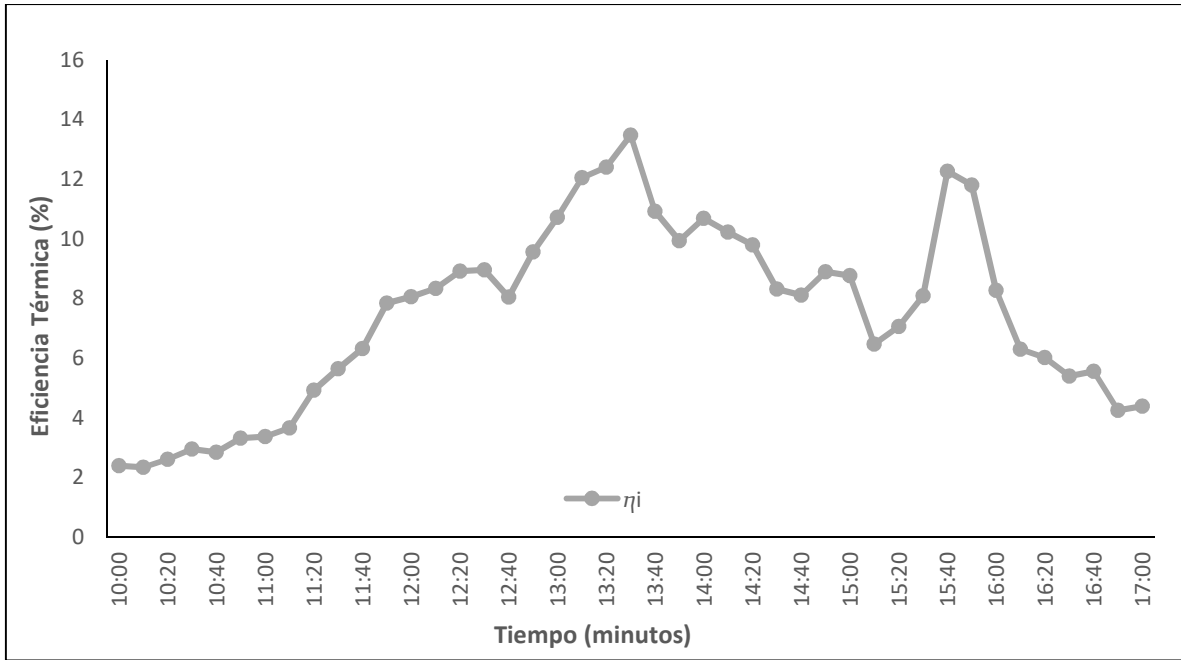


Ilustración 37. Eficiencias del destilador solar en la tercera prueba.

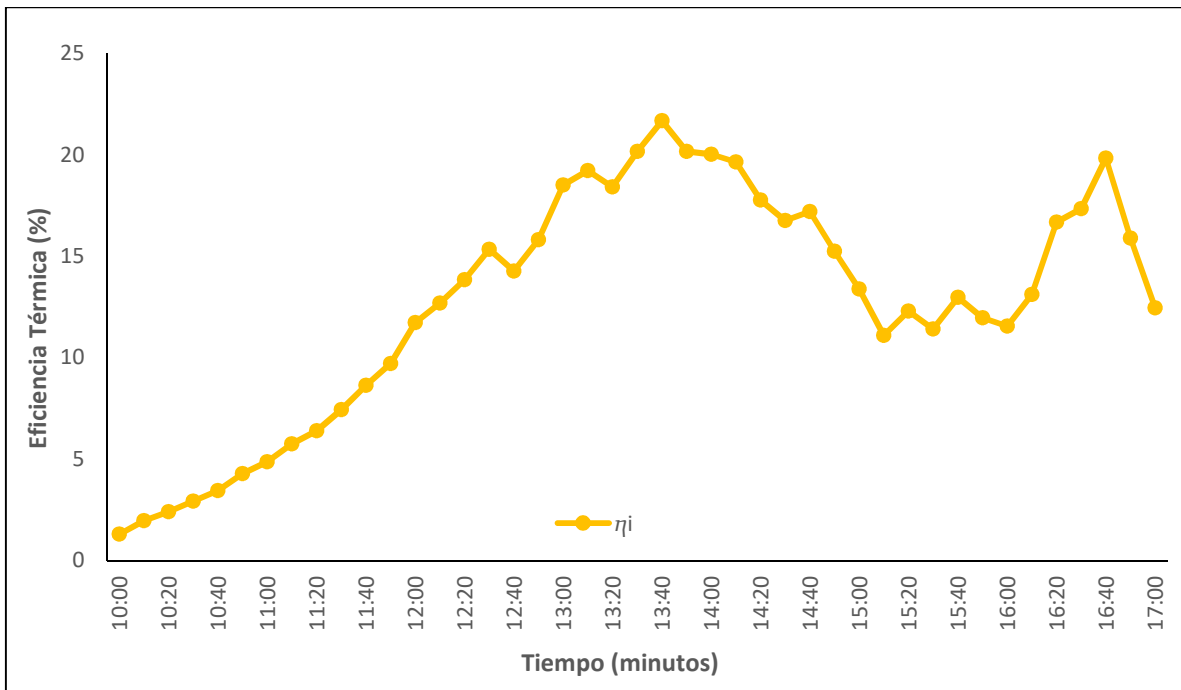


Ilustración 38. Eficiencias del destilador solar en la cuarta prueba.

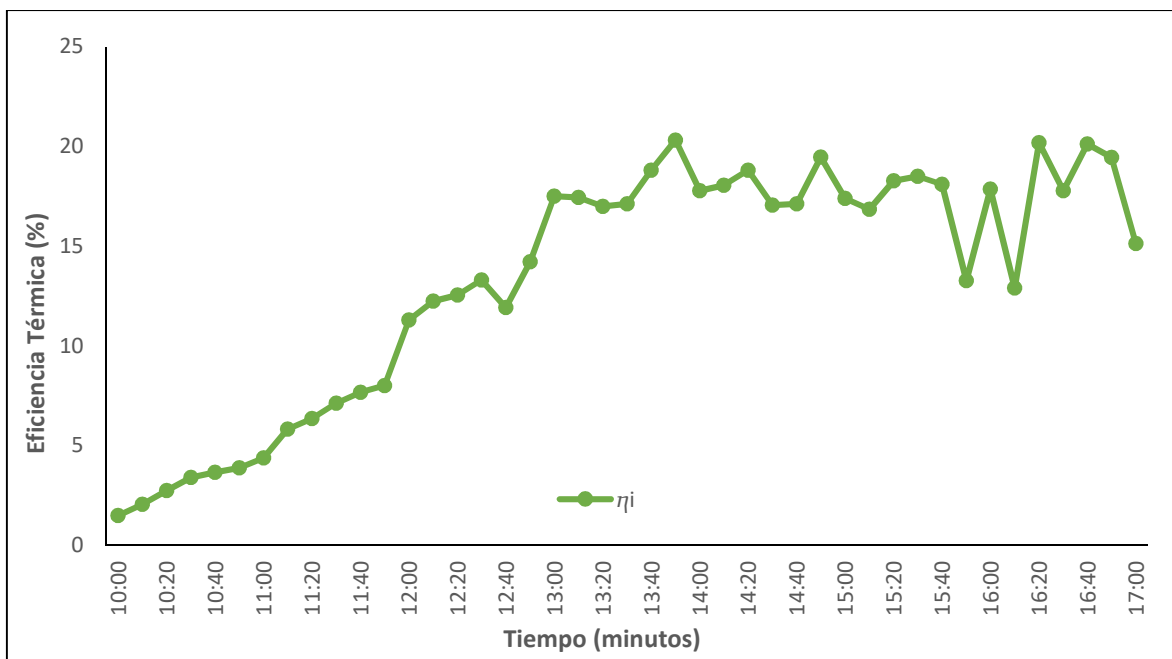


Ilustración 39. Eficiencias del destilador solar en la quinta prueba.

Para la prueba uno (ilustración 35), se muestran eficiencias dentro de un rango del 1% hasta el 14.9%, para la prueba dos (ilustración 36), eficiencias dentro de un rango del 2.7% hasta el 19.4%, para la prueba tres (ilustración 37), eficiencias dentro de un rango del 2.3% hasta el 13.5%, para la prueba cuatro (ilustración 38), eficiencias dentro de un rango del 1.3% hasta el 21.7% y por último, para la prueba cinco (ilustración 39), eficiencias dentro de un rango del 1.5% hasta el 20.3%.

6 Discusión de resultados

A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos:

- **Remoción de arsénico**

Los resultados para remoción de arsénico (As), empleando un destilador solar, muestran que el agua destilada presentó una concentración menor a 2 ppb de As (0.002 mg/l de As), lo cual quiere decir que se presentó una eficiencia de eliminación de este compuesto cercana al 100%, al tener cuatro muestras iniciales con concentraciones superiores de la norma NOM-127-SSA1-1994 (0.025 mg/l de As) y después de la primera hora en cada una de las cinco pruebas, las muestras de agua destilada no presentaron concentraciones de As.

- **Comportamiento térmico del destilador solar**

Se tuvieron eficiencias térmicas máximas instantáneas de 14.9, 19.4, 13.5, 21.7 y 20.3% en el horario de las 14:10, 14:20, 13:30, 13:40 y 13:50 horas para las pruebas 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente y dichas eficiencias fueron obtenidas por medio de los datos registrados de las temperaturas y la radiación solar. En las pruebas experimentales se registraron temperaturas en las aletas de entre los 66.2°C y los 73.4°C, temperaturas de la charola de entre los 60.4°C y los

68°C, temperaturas del fluido de 58.5°C y los 65.8°C, temperaturas del vidrio inclinado interno de entre los 52.7°C y los 60.4°C, temperaturas del ambiente de entre los 25.8°C y los 37.4°C y por último radiaciones solares de entre los 937.1 W/m² y los 1051.4 W/m². Es importante mencionar que en las aletas se presentaron las temperaturas más altas de todos los puntos donde se colocaron termopares tipo K durante las pruebas de destilación solar y también cabe mencionar que la prueba que registro cantidades más bajas en las temperaturas fue la prueba número 3, ya que ese día se presentaba mayor nubosidad en el clima y por otra parte la que registro cantidades más altas en las temperaturas fue la prueba número 2, que presentó un día más soleado que en los demás días de pruebas.

Con respecto a la variación existente entre las concentraciones de arsénico, las temperaturas y la eficiencia, se observa que la eficiencia térmica máxima más baja fue presentada en la prueba número tres (concentración de 0.33 mg/l) y las temperaturas registradas de las aletas, de la charola, del fluido y del vidrio inclinado interno, junto con la radiación solar de la zona también fueron las más bajas de las pruebas realizadas. Por otra parte, la eficiencia térmica máxima más alta fue presentada en la prueba número cuatro (concentración de 0.5 mg/l) y las temperaturas registradas de las aletas, de la charola, del fluido y del vidrio inclinado interno, junto con la radiación solar de la zona también fueron las más elevadas de las pruebas realizadas.

Se evaluaron las cinco pruebas experimentales de destilado solar, para determinar la eficiencia térmica del mismo, para lo cual se emplearon las temperaturas obtenidas en el vidrio y en el agua, junto con la radiación solar. Mediante este análisis se obtuvo una eficiencia instantánea general del 10.5%, el valor bajo de la eficiencia principalmente se debe a las condiciones climáticas, ya que se presentaban periodo de nubosidad en cada prueba experimental, otro parámetro que es importante mencionar es el aislamiento del destilador solar, ya que presentó fugas en ciertos puntos de su sellado. Aunado a ello, se podrían dar algunas recomendaciones para que este porcentaje aumentara en futuros proyectos de investigación, tales como:

- I. Implementación de algún adhesivo o material que permita un mejor aislamiento durante las pruebas de destilación solar.
- II. Hacer las pruebas durante un día que el clima se presente de forma constante (primordialmente un día soleado).
- III. Colocar el destilador solar y el piranómetro en un lugar donde no le de sombra en alguna hora en específico.

- **Volumen de agua destilada**

Para cada una de las pruebas se obtuvo un volumen diferente de destilado, la prueba número uno que contenía una concentración inicial de 0.016 mg/l tuvo un volumen de agua destilada de 0.9 litros (se destiló el 30% del volumen total inicial de 3 litros), la prueba número dos que contenía una concentración inicial de 0.050 mg/l tuvo un volumen de agua destilada de 0.8 litros (se destiló el 26.7% del volumen total inicial de 3 litros), la prueba número tres que contenía una concentración inicial de 0.33 mg/l tuvo un volumen de agua destilada de 0.5 litros (se destiló el 16.7% del volumen total inicial de 3 litros), la prueba número cuatro que contenía una concentración inicial de 0.5 mg/l tuvo un volumen de agua destilada de 0.6 litros (se destiló el 20%

del volumen total inicial de 3 litros) y por último, la prueba número cinco que contenía una concentración inicial de 0.0283 mg/l tuvo un volumen de agua destilada de 0.6 litros (se destiló el 20% del volumen total inicial de 3 litros).

Con respecto a la variación existente entre las concentraciones de arsénico y el volumen destilado obtenido, se observa que mientras más baja fue la concentración de arsénico, se obtuvo más volumen de agua destilada, ya que durante la experimentación la mayor cantidad de agua destilada se obtuvo durante la prueba número uno, en la cual se tuvo la concentración más baja de arsénico y por otro lado, el volumen más bajo de agua destilada se obtuvo durante la prueba número cuatro donde se ocupó la concentración más alta de arsénico.

Por último, el volumen total de agua contaminada con As durante las cinco pruebas fue de 15 litros, mientras que el volumen total de agua destilada en las cinco pruebas experimentales fue de 3.5 litros, por lo cual, al analizar estos resultados se obtiene un porcentaje de recuperación de agua libre de As del 23.3%. Sin embargo, es importante considerar que cada día se hizo una prueba distinta. Una misma muestra podría haberse dejado más días incrementando el volumen del destilado recuperado final.

7 Conclusiones

Como resultado del proyecto de investigación presentado, es posible concluir que las muestras de destilado no presentaron arsénico desde la primera y hasta la última hora después de su obtención, por lo cual la destilación solar es una técnica confiable para la eliminación del arsénico, presentando un porcentaje de eliminación del 100%.

Por otro lado, se realizó un análisis del funcionamiento termodinámico del destilador solar tipo caseta aletado con reflectores internos, determinándose que la eficiencia promedio en las cinco pruebas resultó ser del 10.5% atribuido a las condiciones climatológicas de los días de prueba, las fugas presentadas gracias a un deficiente aislamiento del destilador solar y por último, a una posible influencia de la colocación del destilador solar y el piranómetro, ya que en alguna hora de experimentación el destilador solar y el piranómetro no recibieron la radiación solar directa. También se obtuvo el volumen de agua destilada a partir de tres litros de agua con diferentes concentraciones de As durante cada una de las cinco pruebas experimentales, en la cual se obtuvo 0.9, 0.8, 0.5, 0.6 y 0.6 litros para la prueba 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente, dando un volumen total final de 3.5 litros de agua destilada libre de arsénico.

8 Referencias bibliográficas

Aguilar Ibarra, A. (2009). Gestión de la calidad del agua subterránea con la participación de usuarios. *Revista Digital Universitaria*, 10, 8 (4).

Aguirre Lozano, O., Alarcón Herrera, M. T., Albores Medina, A., Alfaro de la Torre, M. C., Antúnez Prieto, J., Armienta Hernández, M. A., Arreola Mendoza, L., Ballinas-Casarrubias, M. de L., Barajas Rocha, C., Barbier, O. C., Becerril Fuentes, Y., Camacho-Galván, M. N., Casanueva Vargas, J. M., Cassassuce, F., Cárdenas González, M., Cardona Benavides, A., Corona-Núñez, R. O., Coronel Enríquez, C., Cubillas Tejeda, A. C., Del Razo Jiménez, L. M., Fonseca Velázquez, R. A., García López, A. J., García-Salcedo, J. J., Gonsebatt Bonaparte, M. E., González Herrera, A., González-Horta, M. del C., Gutiérrez M., M. T., Jiménez Córdova, M. I., Labastida Núñez, I., Ledón Roig, J. M., León Arce, M., Madrigal Bulnes, A., Marmolejo Rodríguez, A. J., Martín Domínguez, A., Martínez Cruz, D. A., Mejía Lechuga, P., Mena Aguilar, G., Mink, T., Morales Arredondo, J. I., Murillo Jiménez, J. M., Olmos Márquez, M. A., Ortiz Pérez, M. D., Pérez Castrejón, S., Poblete Naredo, I., Piña Soberanis, M., Reygadas Robles Gil, F., Reynoso Cuevas, L., Rivera Huerta, M. de L., Ruiz Smith, G., Salinas Aguirre, J. E., Sánchez-Ramírez, B., Terrell, D., Valles Aragón, M. C., Velasco Estudillo, M. N., Vera Tenorio, N., y Villegas Mendoza, I. E. (2018). *Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia en México* (1era ed.). México: S.N. 18-20.

Calvo-Brenes G., Mora-Molina J., Quesada-Kimsey J. y Quesada-Carvajal H. (2010). Aplicación de la tecnología de membranas en el tratamiento de algunos residuos líquidos altamente peligrosos. *Revista Tecnología en Marcha*, 23(1):94–106.

Chulluncuy Camacho, N. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, *Revista Ingeniería Industrial*, (29), 153-170.

Cui, J., Jing, C., Che, D., Zhang, J. y Duan, S. (2015). Groundwater arsenic removal by coagulation using ferric (III) sulfate and polyferric sulfate: A comparative and mechanistic study. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 32, 42-53.

Dévora-Isiordia, G. E., López-Mercado, M. E., Fimbres-Weihs, G. A., Álvarez-Sánchez, J., y Astorga-Trejo, S. (2016). Desalación por ósmosis inversa y su aprovechamiento en agricultura en el valle del Yaqui, Sonora, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(3), 155-169.

Dunkle, R.V. (1961). Solar Water Distillation: The Roof Type Still and a Multiple Effect Diffusion Still. *Proceedings of International Heat Transfer Conference, University of Colorado, Boulder, Colorado, Part V*, 895-902.

Elango C., Gunasekaran N., y Sampathkumar K. (2015). Thermal models of solar still - A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 856–911.

Escobedo Bretado J., Martín Domínguez I.R. y Alarcón Herrera M.T. (2009) Simulación y análisis paramétrico de un sistema para destilación solar de agua, basado en humidificación-deshumidificación de aire. *Memorias de la XXXIII Semana Nacional de Energía Solar. ANES - ISES. Artículo STS-50*, pp.797-803.

Ferrer, O., Gibert, O. y Cortina, J.L. (2016). Reverse osmosis membrane composition, structure and performance modification by bisulphite, iron(III), bromide and chlorite exposure, *Water Research*, 103, 256-263.

Francisca, F. M. & Carro Pérez, M. E. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. Departamento de Construcciones Civiles FCEfyN-UNC, Universidad Nacional de Córdoba (UNC) y Consejo Nacional de Investigaciones. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30 (2), 177–190.

Lillo, J., y Gemm, V. (2007). Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas, 1- 33. Recuperado de: <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Peligros%20geoqu%C3%ADmicos%20del%20ars%C3%A9nico%20-%20Javier%20Lillo.pdf>

Limón Portillo, A. (2017). Energía solar en México: su potencial y aprovechamiento. CIEP- Centro de Investigación Económica y Presupuestaria. Sitio web: <https://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/>

Mercado, C., & Lam, E. (2015). Evaluación de un sistema de desalinización solar, tipo concentrador cilíndrico parabólico de agua de mar. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 6 (4), 19-28.

Nascimento, F. T. do, Nascimento, C. A. do, Spilki, F. R., Staggemeier, R., y Lauer Júnior, C. M. L. (2018). Efficacy of a solar still in destroying virus and indicator bacteria in water for human consumption. *Revista Ambiente & Água*, 13 (4), e2084. Epub August 09, 2018. <https://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2084>

Pallante Rojas, C. (2015). Implementación de destiladores solares para la recuperación de agua desde piscinas de evaporación de Enaex planta Río Loa. Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Paredes Ramírez, J. L. (2012). Remoción de arsénico del agua para uso y consumo humano mediante diferentes materiales de adsorción. Tesis de Maestría, 16-23.

Pérez F., Prieto F., Rojas A., Marmolejo Y., Salinas E. y Patiño F. (2006). Estudio de eliminación de arsénico con resinas de intercambio iónico en agua potable de Zimapán, Estado de Hidalgo, México. *Revista de Metalurgia* 42(5): 391-395.

Pozos Vázquez, C., Acuña Díaz, V. D. y Torres Cruz, V. D. (2018). Design of a Sea Water Distiller Using Thermo-Solar Energy. *European Scientific Journal*, 14 (9), 60-67.

Rangel Montoya, Edelweiss Airam, Montañez Hernández, Lilia E., Luévanos Escareño, Miriam P., & Balagurusamy, Nagamani. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 103-118. Recuperado en 26 de agosto de 2019, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018757792015000200103&lng=es&tlng=es.

Reyna Ávila, B. (2014). El intercambio iónico, su descripción y comportamiento químico. Trabajo de investigación para obtener el título de: Ingeniero químico industrial, 24-33.

Secretaría de Economía. (2016). "Análisis de agua - Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba". Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2016. Diario Oficial de la Federación. 7 de diciembre de 2016.

Secretaría de Salud. (1995). "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización". Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Diario Oficial de la Federación, 3 de febrero de 1995.

SEMARNAT.(2015). 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. Recuperado de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018

Sepúlveda, S. R. (2009). El arsénico en la contaminación de aguas subterráneas. Ciencia UANL, 7(3), 239.

Sorlini, S., Gialdini, F., & Collivignarelli, M. C. (2014). Survey on full-scale drinking water treatment plants for arsenic removal in Italy. Water Practice and Technology, 9 (1), 42-51.

Torchia, J. y Cervantes, J. (2013). Discusión sobre el modelado de la destilación solar: experimentos y teoría. Tecnología en Marcha. 26 (4), 100-108.

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.

9 Apéndices

Tabla A.1. Datos experimentales de temperatura y radiación solar para la prueba uno.

Temperaturas (°C)						
Hora	Radiación (W/m^2)	T_{∞}	TVI-I	TF	TCH	TA
10:00	574.4	19.7	12.7	15.5	21.3	22.5
10:10	599.6	16.8	17.1	20.2	29.3	32.8
10:20	618.4	20.4	19.1	22.5	32.6	35.7
10:30	627.9	22.3	20.5	24	35.4	36.8
10:40	611.7	20	19.8	23.2	35.5	37.3
10:50	677.8	21.4	23.1	26.7	36.1	40.4
11:00	696	24	23.8	27.6	36.8	41.8
11:10	839.6	23.2	26.2	30.1	44.7	46.4
11:20	865.8	26.3	34.5	38.6	49	49.7
11:30	906.7	25.6	38.9	43.5	50.7	53
11:40	914	24.9	43.2	48	54.3	55
11:50	939.2	27.5	45.5	50.4	56.4	57.8
12:00	970.6	27.5	47.6	52.7	58.5	60.6
12:10	991.8	25.8	48.8	54	59.9	61.1
12:20	996.9	26.3	50.9	56.4	60.8	63
12:30	1009.8	24.9	50	55.5	58.4	60.2
12:40	1033.5	29.1	51.1	56.8	60.4	61.3
12:50	1026.2	28.2	52.7	58.2	61.1	63.2
13:00	983.2	25.6	52.7	58.2	61.1	63
13:10	997.7	23.2	50	55.6	59.1	61.5
13:20	986.4	28.7	50.9	56.4	58.9	61.1
13:30	1010.5	23.5	50.9	56.4	60.1	61.6
13:40	1000	27.5	51.4	57	59.5	61.4
13:50	1002.1	28.7	51.5	57.2	59.3	62
14:00	1000	26.1	53.8	59.4	60.3	64.1
14:10	990.6	25.8	54.6	60.2	61.9	66.2
14:20	956	23.7	54.3	59.7	61.5	66.2
14:30	978	26.1	54.4	59.6	61.9	67.8
14:40	932.9	25.4	54.2	59.3	61.4	67.6
14:50	952.8	27	53.9	59.1	61.7	68.3
15:00	968.6	26.9	53.7	58.8	62.4	69.2
15:10	956.5	25.4	50.2	55.3	62.1	68.1
15:20	880.3	25.1	46.9	51.9	62.7	67.3
15:30	872.1	24.9	45.5	50.4	57.6	67.3
15:40	830.2	24.4	43.2	47.9	59.8	67.1
15:50	820.8	25.6	44.8	49.2	58.9	68.3
16:00	809.2	29.6	44.1	48.4	58.8	72.3
16:10	786.2	30.8	45.1	49.2	59.7	71.1
16:20	704.4	32.2	44.6	48.6	59.2	69.9
16:30	662.5	31.2	44.4	47.9	58.5	69
16:40	646.9	27.7	40.9	44.5	57.6	67.1
16:50	600.6	30.8	40.4	43.6	55.3	65.5
17:00	539.8	28.2	41.1	44.2	55.3	64.8

Tabla A.2. Datos experimentales de temperatura y radiación solar para la prueba dos.

Temperaturas (°C)						
Hora	Radiación (W/m ²)	T _∞	TVI-I	TF	TCH	TA
10:00	276.7	18	19.3	22.2	25.3	27.2
10:10	357.4	19.5	21	24	27.9	29.3
10:20	428.7	22.3	25	28.2	30.7	32.6
10:30	543	21.1	26	29.3	31.7	34
10:40	582.6	20.4	26.7	29.9	33.5	35.4
10:50	641.7	20.2	27.4	30.7	34.7	36.4
11:00	676.3	20	29.3	32.8	35.4	37.8
11:10	668.2	23	30	33.7	37.1	39.2
11:20	707.3	22.3	30.1	34.2	38.2	40.8
11:30	790.6	20.4	32.5	36.9	41.1	43.2
11:40	848	19.2	34.5	39.1	40.6	43.2
11:50	950.7	25.4	34.6	39.4	42.7	46.2
12:00	948.6	27.5	38.6	43.7	45.8	47.4
12:10	963.1	18.7	41.3	46.5	48.2	49.7
12:20	996.6	21.1	40.9	46.4	48.5	49.9
12:30	978	30.1	44.7	50.2	51.3	54.3
12:40	987.4	23.2	48.3	53.6	55.3	58.5
12:50	972.7	25.6	50.9	56.4	58.1	61.6
13:00	987.4	26.3	51.1	56.6	58.3	62.3
13:10	991.6	27.5	52.8	58.6	61.2	63
13:20	997	27.5	54.9	60.5	61.9	64.8
13:30	1007.3	24.7	56.2	61.7	63	66.9
13:40	1002.3	27	57.1	62.7	63.6	68.3
13:50	1004.2	32.2	57.3	63	63.9	68.5
14:00	970.6	32.2	58.4	64	65.3	69.5
14:10	974.8	30.1	58.2	63.8	65	70.2
14:20	960.2	29.4	60.4	65.8	68	71.3
14:30	976.8	31.5	58.8	64	65	71.3
14:40	937.1	31	57.5	62.6	66	71.3
14:50	911.5	27.2	54.3	59.5	62	66.9
15:00	856.4	25.8	53.9	59	61.2	63.2
15:10	841.1	26.5	50.9	56	56.7	62.5
15:20	841.7	31.2	48.1	53.1	55.7	63
15:30	832.3	28.9	49.6	54.5	57.6	65
15:40	809.2	28.7	53	57.7	59.5	64.6
15:50	744.9	30.3	52.4	56.8	58.8	66
16:00	706.5	29.4	52.6	56.9	58.5	66.7
16:10	593.3	28	51.6	55.7	58.5	66.7
16:20	441.3	26.3	49.2	53.2	56	62.7
16:30	362.5	26.1	46.9	50.3	52.5	56.9
16:40	343.3	24.9	40.2	43.7	49	53.2
16:50	258.3	24.4	38.2	41.3	46	49.9
17:00	224.3	25.4	37	40.1	43.6	48.5

Tabla A.3. Datos experimentales de temperatura y radiación solar para la prueba tres.

Temperaturas (°C)						
Hora	Radiación (W/m^2)	T_{∞}	TVI-I	TF	TCH	TA
10:00	451.8	20	23.2	26	31.9	32.8
10:10	623.7	19.7	26.1	29.2	34.7	36.8
10:20	677.6	19.7	28	31.3	37.1	39.7
10:30	731.7	22.3	31	34.4	40.1	43
10:40	782.7	24	34.1	37.2	43.6	47.1
10:50	854.7	25.4	36.2	39.6	46.7	49.7
11:00	886.2	25.4	36.4	39.9	48.8	52
11:10	907.1	23.2	36.9	40.6	51.3	54.1
11:20	934.4	26.1	41.1	45.1	53	55.5
11:30	963.7	24	43	47.2	54.6	57.4
11:40	964.8	26.5	44.6	48.9	56.2	59.2
11:50	954	24.4	45.5	50.3	57.4	61.1
12:00	986.4	26.1	45.5	50.5	56.9	61.1
12:10	955.4	24.7	44.4	49.6	55.5	59
12:20	970.6	23	45.5	50.8	55.7	59.2
12:30	985.7	26.1	44.8	50.3	55.5	58.3
12:40	992.5	22.3	43.9	49.2	54.3	55.7
12:50	1005.4	25.4	46.5	52	55.3	60.9
13:00	1034.8	25.1	48.3	54	57.6	60.6
13:10	1059.5	28.7	50.6	56.4	59.5	63.6
13:20	1062.9	28.9	52.3	57.9	60.6	66
13:30	1051.4	25.8	52.7	58.5	60.4	64.6
13:40	1032.7	23.5	47.6	53.5	56.9	58.8
13:50	1030.4	26.8	46.7	52.4	55.7	59.5
14:00	1063.3	28.2	49.3	54.9	56.9	63.4
14:10	1035.6	23.2	47.9	53.5	57.4	59
14:20	1035.2	26.5	48.1	53.5	55.7	60.6
14:30	1042.8	26.3	46.1	51.3	53.6	59.9
14:40	1026.2	26.1	45.8	50.9	56.7	60.2
14:50	1010.5	27	46.8	52	57.6	63.9
15:00	1026.8	24.4	47.4	52.5	55	58.1
15:10	996	26.3	40.8	45.9	48.8	56.7
15:20	996.6	23.7	43.1	48.1	49.2	58.5
15:30	977.4	24.9	46	50.9	54.8	63.4
15:40	869.4	24.7	53.2	57.9	58.5	63.4
15:50	781.3	28.2	52.2	56.6	57.6	67.4
16:00	771.5	24.2	45.5	49.8	52.3	56.7
16:10	764.2	24.9	41.3	45.4	49	52
16:20	686.2	23.5	39	43	46.4	49.5
16:30	570	25.4	37.8	41.2	44.6	48.8
16:40	556.8	24	37.1	40.6	43.4	46.7
16:50	510.7	23.5	34.5	37.5	42	44.1
17:00	464.6	22.8	32.4	35.5	39.9	41.5

Tabla A.4. Datos experimentales de temperatura y radiación solar para la prueba cuatro.

Temperaturas (°C)						
Hora	Radiación (W/m^2)	T_{∞}	TVI-I	TF	TCH	TA
10:00	568.1	18.5	17.2	19.9	27.2	29.7
10:10	550.3	20	21.5	24.5	31.2	33.6
10:20	600.6	19	25.1	28.3	34.9	36.1
10:30	702.3	20.7	30.1	33.5	40.1	41.3
10:40	712.8	20.4	34.3	37.6	43.9	45.5
10:50	744.2	26.3	37.7	41.2	47.6	49.1
11:00	780.9	27	41.1	44.6	50.4	51.8
11:10	800.8	26.5	41.8	45.7	52.7	55.6
11:20	837.5	24.2	44.1	48.1	55.3	56.4
11:30	841.7	24.7	45.8	50	56.4	59.9
11:40	834.4	26.1	47.9	52.2	57.8	61.3
11:50	866.9	28.4	49.7	54.2	57.6	62.5
12:00	892	23.5	50.4	55.5	62.5	63.9
12:10	900.4	25.1	51.6	56.8	62.1	63.6
12:20	887.8	27.5	52.5	57.8	63.2	65.3
12:30	915.3	29.4	54.1	59.6	63.6	66.7
12:40	931.9	25.4	54.1	59.4	63.6	67.8
12:50	974.8	30.3	56	61.5	64.6	68.8
13:00	949.7	31.5	57.6	63.3	66.2	70.4
13:10	962.3	31	58.1	63.9	66.7	72
13:20	976.9	29.1	58.6	64.2	67.1	73.2
13:30	958.1	30.1	59	64.8	67.4	73.4
13:40	937.1	31.7	59.5	65.4	67.6	73.4
13:50	924.5	30.8	58.8	64.5	67.1	73
14:00	929.8	28	59.3	64.9	67.4	72
14:10	884.7	30.3	57.9	63.5	66.2	70.9
14:20	865.8	29.8	56.5	61.9	65.3	69.9
14:30	898.3	30.3	57.2	62.4	65.7	70.4
14:40	920.3	31.5	58.8	63.9	65.5	71.1
14:50	930.8	29.6	56	61.2	65.3	71.6
15:00	920	27.5	53.7	58.8	61.8	65
15:10	901.1	27.7	49.5	54.6	57.6	60.6
15:20	834.1	27.5	50	55.1	56.9	61.1
15:30	827	31.2	49.5	54.4	56.3	62.5
15:40	774.6	31.7	52	56.7	58.4	66.2
15:50	744.4	29.1	51.5	55.9	58.1	65.7
16:00	753.7	32.2	51.7	56	58.5	66.9
16:10	687.2	31.7	53.8	57.9	59.2	66.2
16:20	554.5	29.1	53.6	57.8	58.8	63
16:30	334.4	30.8	50.3	53.7	56.7	61.6
16:40	285.5	28	49	52.5	54.8	59
16:50	240	28.7	42.8	46.1	51.6	56.7
17:00	274.4	26.1	42.4	45.5	50.9	53.2

Tabla A.5. Datos experimentales de temperatura y radiación solar para la prueba cinco.

Temperaturas (°C)						
Hora	Radiación (W/m^2)	T_{∞}	TVI-I	TF	TCH	TA
10:00	537.7	22.8	20.8	23.3	27.2	29.5
10:10	574.4	21.6	25.8	28.5	32.4	34.2
10:20	617.4	25.6	29.8	32.8	37.8	39.9
10:30	649.9	25.8	33.1	36.3	42.2	44.8
10:40	671.9	26.3	34.3	37.6	45.7	46.7
10:50	713	23.2	35	38.5	47.6	49.5
11:00	769.4	24.9	38.8	42.3	50.4	53.9
11:10	754.7	26.8	40.9	44.8	53.2	56.2
11:20	797.7	28.4	43	47	55.5	57.8
11:30	818.7	29.1	44.4	48.6	57.1	60.2
11:40	854.3	28.7	46	50.3	58.3	61.6
11:50	842.8	29.4	45.3	49.8	59.2	63.9
12:00	863.7	28.4	49	54.1	60.4	63.2
12:10	909.9	29.1	51.1	56.3	61.8	64.6
12:20	891	30.3	50.6	55.9	62.5	65
12:30	909.9	25.6	51.1	56.6	62.7	67.1
12:40	971.7	33.1	51.3	56.6	63.4	68.1
12:50	968.6	32.4	53.7	59.2	65.7	67.8
13:00	994.8	35	57.4	63.1	66.9	71.1
13:10	1014.7	32.7	57.2	63	66.4	71.8
13:20	998.4	32.9	57.4	63	66.7	72
13:30	975	32.9	56	61.8	65	70.2
13:40	965.4	33.1	57.2	63.1	66	71.8
13:50	973.8	37.4	60	65.7	67.8	73.6
14:00	945.5	32.9	57.2	62.8	67.6	72.3
14:10	963.3	34.3	57.9	63.5	67.4	72.7
14:20	981.1	33.4	60.2	65.6	68.8	72.7
14:30	931.9	31.5	58.3	63.5	67.1	71.3
14:40	924.5	35.7	58.8	63.9	67.4	71.6
14:50	896.2	33.6	60.2	65.4	68.1	72.5
15:00	901.5	34.3	58.6	63.7	66.9	72.5
15:10	899.4	37.1	57.9	63	65	72.7
15:20	866.9	34.5	58.8	63.9	66	73.9
15:30	799.8	34.8	58.6	63.5	65.7	73
15:40	804	34.5	59.5	64.2	65.5	74.3
15:50	699.2	32.2	52.3	56.7	60.9	65.3
16:00	541.3	36	53.8	58.1	61.6	69.2
16:10	503.1	29.4	47.2	51.3	57.1	60.2
16:20	279.2	28.2	43.7	47.9	52.7	53.6
16:30	249.9	29.1	40.4	44.4	49	49.9
16:40	230.6	29.8	42.7	46.5	49.2	56
16:50	173	33.6	38.7	42.2	47.4	53.2
17:00	170.9	28.4	35.2	38.5	46	54.3

Tabla A.6. Volumen de agua destilada obtenida en las cinco pruebas.

Volumen destilado (ml)					
Hora	Volumen destilado en prueba 1 (ml)	Volumen destilado en prueba 2 (ml)	Volumen destilado en prueba 3 (ml)	Volumen destilado en prueba 4 (ml)	Volumen destilado en prueba 5 (ml)
10:00 a 11:00	-	-	-	-	-
11:00 a 12:00	36.3	-	58.8	28.8	51.3
12:00 a 13:00	88.8	103.8	133.8	96.3	88.8
13:00 a 14:00	156.3	217.8	96.3	133.8	103.8
14:00 a 15:00	229.8	231.3	88.8	171.3	156.3
15:00 a 16:00	208.8	133.8	51.3	118.8	141.3
16:00 a 17:00	141.3	96.3	43.8	96.8	58.8
17:00	51.5	36.3	-	-	28.8

Tabla A.7. Volumen de agua destilada obtenida en las cinco pruebas.

Numero de prueba	Volumen destilado (ml)
Prueba 1	912.8
Prueba 2	819.3
Prueba 3	472.8
Prueba 4	645.8
Prueba 5	629.1
Volumen total de 3479.8 ml = 3.4798 l ≈ 3.5 l	

Tabla A.8. Eficiencias del destilador solar en todas las pruebas.

Porcentaje de eficiencia (% η i)					
Hora	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
10:00	1	3.3	2.4	1.3	1.5
10:10	1.5	3	2.3	2	2.1
10:20	1.8	3.4	2.6	2.4	2.8
10:30	2	2.9	3	2.9	3.4
10:40	1.9	2.7	2.9	3.5	3.7
10:50	2.3	2.7	3.3	4.3	3.9
11:00	2.5	3	3.4	4.9	4.4
11:10	2.4	3.5	3.7	5.7	5.8
11:20	3.9	3.8	4.9	6.4	6.4
11:30	5.6	4.3	5.6	7.4	7.1
11:40	7.3	4.7	6.3	8.6	7.7
11:50	8.2	4.5	7.9	9.7	8
12:00	9.4	6.1	8.1	11.7	11.3
12:10	10	7.1	8.3	12.7	12.3
12:20	12	7.3	8.9	13.8	12.6
12:30	11.4	9	9	15.3	13.3
12:40	12.3	10.1	8.1	14.3	11.9
12:50	12.8	12.3	9.6	15.8	14.2
13:00	13.3	12.3	10.7	18.5	17.5
13:10	11.8	14.4	12.1	19.2	17.4
13:20	12.2	15	12.4	18.4	17
13:30	11.9	15.5	13.5	20.2	17.1
13:40	12.6	16.7	10.9	21.7	18.8
13:50	13	17.3	9.9	20.2	20.3
14:00	14.2	18.4	10.7	20	17.8
14:10	14.9	18.1	10.2	19.7	18
14:20	14.4	19.4	9.8	17.8	18.8
14:30	13.4	16.7	8.3	16.8	17.1
14:40	13.5	15.9	8.1	17.2	17.1
14:50	13.4	14.3	8.9	15.3	19.5
15:00	12.7	14.5	8.8	13.4	17.4
15:10	10.8	12.8	6.5	11.1	16.8
15:20	9.7	10.8	7.1	12.3	18.3
15:30	8.9	11.4	8.1	11.4	18.5
15:40	7.8	13.1	12.3	13	18.1
15:50	7.8	12.5	11.8	12	13.3
16:00	7.4	12.9	8.3	11.6	17.8
16:10	7.4	13.6	6.3	13.1	12.9
16:20	7.8	15.7	6	16.7	20.2
16:30	6.8	13.5	5.4	17.4	17.8
16:40	6.1	10.6	5.6	19.8	20.1
16:50	5.4	10.7	4.3	15.9	19.4
17:00	5.9	11.6	4.4	12.5	15.1

Tabla A.9. Eficiencia total del destilador solar en todas las pruebas.

Numero de prueba	Porcentaje de eficiencia (η)
Prueba 1	8.6
Prueba 2	10.5
Prueba 3	7.5
Prueba 4	12.7
Prueba 5	13.4
	Promedio de eficiencia del 10.5%