



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), marzo-abril 2024,
Volumen 8, Número 2.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2

**DETERMINACIÓN DE LAS VARIACIONES DE
CALCIO SOLUBLE EN LA PRECIPITACIÓN SALINA
EN UN DESTILADOR SOLAR A ESCALA
EXPERIMENTAL**

**DETERMINATION OF SOLUBLE CALCIUM VARIATIONS IN
SALINE PRECIPITATION IN AN EXPERIMENTAL SCALE
SOLAR DISTILLER**

Saúl Iram Armendáriz Ramírez

Estudiante del Centro de Desarrollo de Estudios Superiores (CDES), México

Petros G. Koutsoukos
University Campus GR, Grecia

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2.10910

Determinación de las Variaciones de Calcio Soluble en la Precipitación Salina en un Destilador Solar a Escala Experimental

Saúl Iram Armendáriz Ramírez¹sarmendariz2024@cdes.edu.mx<https://orcid.org/0009-0001-9274-4415>Estudiante del Centro de Desarrollo de
Estudios Superiores (CDES)
México**Petros G. Koutsoukos**pgk@chemeng.upatras.gr<https://orcid.org/0000-0002-9898-5914>University of Patras
University Campus GR
Grecia

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue estudiar la precipitación salina a temperatura constante de 75 °C en un destilador solar experimental. Se utilizó agua subterránea con alto contenido de calcio, bicarbonatos y sulfatos solubles como afluente. Una de las variables más importantes en la operatividad y productividad de agua potable con esta tecnología es la precipitación salina en la base del destilador. Esta ocurre debido a las características fisicoquímicas del agua subterránea típica de las zonas desérticas del norte del estado de Chihuahua. Las variaciones en la concentración de calcio soluble del afluente se midieron cada hora con un espectrofotómetro de absorción atómica y se calculó la cantidad total precipitada de calcio. Con la técnica de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido se analizó el precipitado. Se determinó que la reacción de la precipitación se estabilizó a la tercera hora. La concentración de calcio aumentó durante la cuarta y la quinta hora, lo que indicó que el calcio soluble remanente no reaccionó. Se concluye que la reacción de precipitación salina no es isotérmica, sino que está impulsada por gradientes de temperatura. En el análisis de la identificación de las fases cristalinas del precipitado en las incrustaciones se encontró CaCO_3 en forma de calcita y CaSO_4 como anhidrita y basanita.

Palabras clave: precipitación salina, incrustaciones, calcita, anhidrita, basanita

¹ Autor principal

Correspondencia: sarmendariz2024@cdes.edu.mx

Determination of Soluble Calcium Variations in Saline Precipitation in an Experimental Scale Solar Distiller

ABSTRACT

The objective of the research was to study salt precipitation at a constant temperature of 75 °C in an experimental solar still. Groundwater with high content of calcium, bicarbonates and soluble sulfates was used as an input water. One of the most important variables in the operability and productivity of drinking water with this technology is the saline precipitation at the base of the distiller. This occurs due to the physicochemical characteristics of the groundwater typical of the desert areas of the north of the state of Chihuahua. Variations in the soluble calcium concentration of the input water were measured every hour with an atomic absorption spectrophotometer and the precipitated amount was calculated. The precipitate was analyzed using the X-ray diffraction and scanning electron microscopy technique. It was determined that the precipitation reaction occurred between the first and second hours. The calcium concentration increased during the fourth and fifth hours, indicating that the remaining soluble calcium did not react. It concludes that the salt precipitation reaction is not isothermal but is driven by temperature gradients. The analysis of the identification of the crystalline phases of the precipitate in the scales found CaCO_3 in the form of calcite and CaSO_4 as anhydrite and bassanite.

Keywords: *saline precipitation, scale, calcite, anhydrite, bassanite*

Artículo recibido 23 marzo 2024

Aceptado para publicación: 25 abril 2024



INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable y el saneamiento es imprescindible para la vida y un derecho humano reconocido. Asimismo, el agua es de vital importancia para el desarrollo sostenible, desde la salud y la nutrición hasta la igualdad de género y la economía. La mejora del abastecimiento, el saneamiento y de la gestión de los recursos hídricos puede impulsar el crecimiento económico de los países y contribuir en gran medida a reducir la pobreza.

Durante los próximos años, los problemas relacionados con los recursos hídricos serán más urgentes. El aumento de las demandas de una población cada vez más numerosa y una economía mundial que evoluciona rápidamente, combinado con los efectos del cambio climático, exacerbarán la dificultad del acceso al agua y al saneamiento para usos domésticos (ONU, 2018).

Agua y Salud

El agua contaminada y el saneamiento deficiente contribuyen a la transmisión de enfermedades como el cólera y otras enfermedades diarreicas, la disentería, la hepatitis A, la fiebre tifoidea y la poliomielitis. Si no hay servicios de agua y saneamiento, o si estos son insuficientes o están gestionados de forma inapropiada, la población se encuentra en una posición vulnerable a los riesgos para su salud.

Se calcula que cerca de un millón de personas fallecen cada año a causa de enfermedades diarreicas contraídas como resultado de la insalubridad del agua, de un saneamiento insuficiente o de una mala higiene de las manos. Sin embargo, en la mayor parte de los casos estas enfermedades se pueden prevenir: si se abordasen esos factores de riesgo, cada año se podría evitar que fallecieran unos 395,000 niños menores de cinco años (OMS, 2023).

Datos Clave sobre el Agua

Estas son algunas cifras proporcionadas por la ONU con motivo del Día Mundial del Agua de 2024 que ayudan a entender la situación actual de los recursos hídricos en el mundo y los desafíos a los que se enfrenta la sociedad global.

Unos 2,200 millones de personas todavía carecen de agua potable gestionada de forma segura, incluidos 115 millones de personas que beben agua superficial (OMS/UNICEF, 2023).

Aproximadamente la mitad de la población mundial sufre una grave escasez de agua al menos durante una parte del año (IPCC, 2022). Se prevé que estas cifras aumenten, exacerbadas por el cambio climático y el crecimiento demográfico (OMS, 2022).

Solo el 0.5% del agua de la Tierra es agua dulce aprovechable y disponible, y el cambio climático pone en peligro ese suministro.

El cambio climático, el crecimiento demográfico y la creciente escasez de agua ejercerán presión sobre la oferta de alimentos (IPCC, 2014), ya que la mayor parte del agua dulce utilizada, alrededor del 72% de media, se destina a la agricultura (ONU, 2023).

La salud pública y la prosperidad, los sistemas alimentarios y energéticos, la productividad económica y la integridad ambiental dependen del buen funcionamiento y la gestión equitativa del ciclo del agua.

(ONU, 2024).

El Derecho al Agua

Uno de los hitos recientes más importantes ha sido el reconocimiento por parte de la Asamblea General de las Naciones Unidas del derecho humano al agua y al saneamiento, en julio de 2010.

La Asamblea reconoció el derecho de todos los seres humanos a tener acceso a una cantidad de agua suficiente para el uso doméstico y personal (entre 50 y 100 litros de agua por persona y día), segura, aceptable y asequible (el costo del agua no debería superar el 3% de los ingresos del hogar), y accesible físicamente (la fuente debe estar a menos de 1,000 metros del hogar y su recogida no debería superar los 30 minutos). Este derecho corresponde al Objetivo 6 del Desarrollo Sostenible (ONU, 2023).

La Crisis de Agua en México

De acuerdo con el informe *El Agua en México, Actores, Sectores y Paradigmas*, 12 millones de personas carecen de acceso a agua potable, al mismo tiempo, las sequías se han intensificado durante la última década y la sobreexplotación de los acuíferos se ha incrementado en 15 por ciento.

En México, 102 de los 653 acuíferos se encuentran sobreexplotados y 46% del vital líquido se pierde por fugas en las redes de abastecimiento, además, 80% de los cuerpos de agua del país

presenta algún tipo de contaminación por descargas industriales. En contraste, solo 1 de cada 100 litros de agua que caen por concepto de lluvia es captado para su utilización en distintas actividades y debido a la pobre calidad del agua en la mayoría de las cuencas, México es el país número uno en consumo de agua embotellada del mundo (Toché, 2023).

El acceso al agua es un tema de seguridad nacional, un pilar de la política ambiental, y un factor clave en la política social y económica en México. Su disponibilidad condiciona las posibilidades de crecimiento y desarrollo del país y su calidad es factor determinante para la salud y bienestar de la población. Por su orografía y clima, México es susceptible a la escasez de agua. Además, el país ha enfrentado problemas de sequías y variación en las precipitaciones por efectos del aumento de la temperatura, así como sobreexplotación de los mantos acuíferos, problemas en la red de distribución, contaminación, y falta de control sobre las concesiones. El uso de este recurso natural debe contar con regulación eficiente, gestión e inversión en infraestructura que garanticen el acceso y saneamiento de agua para consumo personal, doméstico, agrícola e industrial. Su uso debe ser equitativo y sostenible, lo cual implica la participación coordinada del Gobierno Federal, las entidades federativas y la ciudadanía (IMCO Staff, 2023).

Una de las problemáticas más graves que enfrenta el Estado Mexicano es la relacionada con el agua. La cobertura nacional de agua potable es 91.6%. En zonas urbanas la cobertura es 95.4%. En zonas rurales (localidades menores a 2,500 habitantes), la cobertura es 78.8% debido a la dispersión de la población en condiciones fisiográficas complejas, y la dificultad técnica y/o financiera de desarrollar sistemas de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales (Senado de la República. LXV Legislatura, 2022).

Crisis de Agua en Chihuahua, México

El 51% del territorio nacional presenta sequía de severa a excepcional. Todo el territorio de los estados de Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro reportan sequía de severa a excepcional; Chihuahua, Sinaloa y San Luis Potosí presentan esa situación en más de 90% de sus territorios. En categoría extrema hay 563 municipios, de los cuales 99 son de Oaxaca, 85 de Michoacán, 54 de Sonora, 49 de Chihuahua y 40 de Guanajuato (Badillo, 2023).

Por otra parte, el Programa de Mediano Plazo. Gestión Hídrica 2022-2027 del Gobierno del Estado de Chihuahua, menciona en dicho programa como enunciado principal: “El reto más grande que vive el estado es la falta de agua. Si no actuamos oportunamente, el servicio hídrico, vital para todas las familias y para las principales actividades comerciales del estado, se verá comprometido en los próximos años”. Además, la Estrategia 6.1 en su línea de acción 6.1.4, indica: “Promover las tesis de licenciaturas, maestrías o doctorados en temas de aplicación práctica a nuestra problemática hídrica local: Remoción de impurezas en agua para consumo humano, sistemas eficientes de conducción y distribución del agua, nuevos sistemas de desinfección, nuevas fuentes de abastecimiento, desalación de aguas salobres, entre otros”, así como la Estrategia 6.2 que señala: “Impulsar proyectos y programas de investigación, innovación tecnológica para el cuidado del medio ambiente (Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua, 2022).

Existen varias comunidades ubicadas en la zona fronteriza México-Estados Unidos que no cuentan con el servicio de agua potable, por lo que reciben agua mediante el acarreo de esta, ya sea por particulares o bien por el gobierno. Sin embargo, la calidad del agua no es la adecuada, ya que presenta contaminantes industriales o por fertilizantes, afectando así de manera directa la salud de los habitantes de dichas comunidades. Este mismo problema se presenta en zonas rurales, donde el agua es extraída de pozos o norias, que generalmente están contaminados por microorganismos que son perjudiciales para la salud para el ser humano. Existen diversas soluciones para tener agua libre de contaminantes químicos y biológicos, sin embargo, algunas de ellas no son convenientes debido a la sofisticación de la tecnología y la zona geográfica donde se localizan estas comunidades. Es por esto que se ha propuesto como una solución el uso de destiladores solares de bajo costo, utilizando el eje de las energías limpias o renovables y con una tecnología fácil de comprender y de aceptar. (Ojinaga y Foster, 2001).

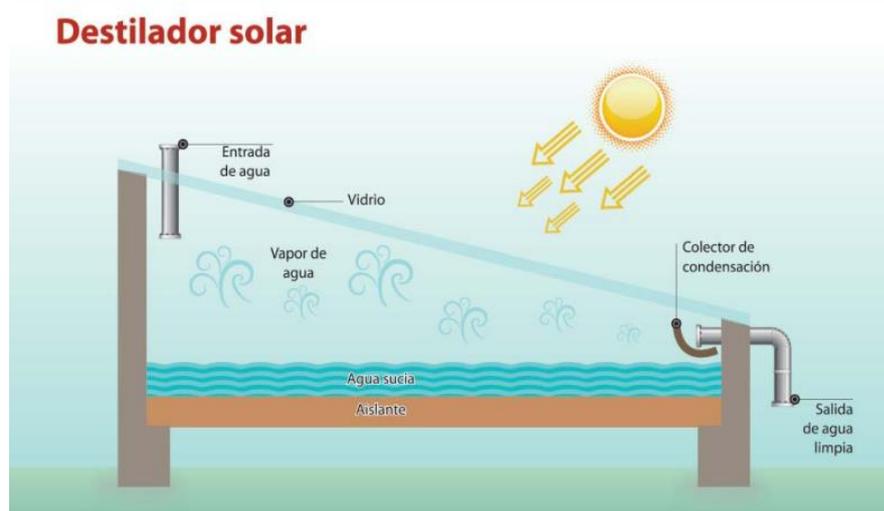
Destilación Solar

Como se puede percibir, la escasez y contaminación del agua a nivel mundial, nacional y estatal se encuentra en estado crítico y su tratamiento es de alto costo. Por esa razón, es necesario abordar alternativas en específico en cuanto a la escasez y calidad del agua, sobre todo en regiones del

norte de México, como en el estado de Chihuahua, en el cual existen vastas zonas desérticas y semi desérticas, donde se encuentran ubicadas comunidades rurales de menos de 5,000 habitantes y la calidad del agua del agua subterránea no cumple con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 relativa a Agua para uso y consumo humano.

Uno de los esquemas atractivos para atacar el problema de la falta de agua potable es por medio de la destilación solar de aguas salinas, ya que estas abundan en lagos extensos, mares intercontinentales y depósitos de agua subterránea. El agua destilada puede ser mezclada con agua salada (si es higiénica) para incrementar el rendimiento de agua y proporcionarle una concentración de dureza menor a 500 ppm. El problema principal, obviamente, es el alto grado de salinidad de tal agua. Los procesos convencionales de destilación, tales como de múltiples etapas, multi-efecto, de capa delgada, ósmosis inversa y electrodiálisis no solo requieren de energía, sino que no son económicamente atractivos para pequeñas demandas de agua dulce. Sin embargo, los avances en el uso de la energía solar han demostrado que esta es adecuada para la desalación, siempre y cuando la demanda de agua no sea muy grande (Armendáriz et al., 2003).

Figura 1. Esquema del funcionamiento de un destilador solar de una vertiente



El principio de funcionamiento reproduce en pequeña escala el ciclo natural del agua, independiente del tipo que sea. Este consiste en una caja o espacio contenedor donde se dispone un recipiente o estanque con fondo de color negro para depositar el agua salada o contaminada a destilar. En la parte superior, y cerrando este espacio, se coloca una superficie transparente que permite pasar la radiación solar, por el efecto invernadero se logra el calentamiento del agua al

tiempo que también se retiene la humedad en el interior de la superficie transparente. La radiación solar entra en contacto con la base del evaporador pintado de negro, que eleva la temperatura del agua en el recipiente, favoreciendo la evaporación, tal como se puede apreciar en la Figura 1.

El vapor de agua asciende entonces por convección hasta topar con la superficie transparente, que por estar en contacto con el exterior está a una temperatura más fría que el resto del destilador. En esta superficie se condensa el agua formando pequeñas gotas. La superficie transparente está dispuesta de manera adecuada para favorecer que las gotas, conforme continúa el proceso, aumenten de tamaño y fluyan hacia un recipiente donde se recoge toda el agua destilada. Mientras dure la radiación solar y exista agua que destilar, el proceso se mantiene (Ojinaga y Foster, 2001). Por lo anterior expuesto, la relevancia de realizar investigaciones científicas, proponer y promover tecnologías, radica en que puedan hacer frente a la problemática de la escasez y/o contaminación de las fuentes de agua para consumo humano, con la finalidad de garantizar la seguridad en cuanto a cantidad y calidad óptima del recurso vital para el ser humano en localidades pequeñas, alejadas de las ciudades y que no cuentan con un adecuado sistema de suministro de agua potable. Más específicamente en localidades ubicadas en zonas áridas y semi áridas del estado de Chihuahua y gran parte de la zona norte de México.

El ritmo anual del 1% de crecimiento del uso de agua y su escasez debido al cambio climático aumentarán la dependencia de las aguas subterráneas, que constituyen el 99% del agua dulce de la Tierra (ONU, 2022). Aunque la destilación solar es una tecnología viable para el tratamiento de agua subterránea que no cumple con la Norma Oficial Mexicana de agua para uso y consumo humano en estas áreas desérticas y semi desérticas del estado de Chihuahua, el alto contenido de calcio soluble, bicarbonatos y sulfatos (característico de las aguas subterráneas de estas zonas), entre otros, da origen a la formación de incrustaciones en la base del destilador.

Eso se deriva en una importante limitante en la producción de agua purificada, ya que las sales formadas hacen que la base del dispositivo cambie de un color negro a uno blanco, impidiendo la adecuada absorción de la radiación solar, lo que impide la conservación de temperatura idónea, como consecuencia, menor cantidad de agua se evapora y menor porción de esta se condensa, disminuyendo drásticamente la producción.

Asimismo, las sales cristalizadas en el evaporador afectan en su operatividad, ya que implica detener el funcionamiento del destilador solar de manera frecuente para eliminar las incrustaciones. Esto se traduce en la nula producción de agua en los días que se realice la limpieza. Por lo anterior, la vida útil del destilador solar se acorta a máximo unos días o un par de semanas, dependiendo de la época del año y la temperatura ambiental, resultando finalmente en una tecnología inoperante para los fines requeridos.

Respecto a este fenómeno de la precipitación salina y formación de incrustaciones en destiladores solares con las características fisicoquímicas del agua subterránea, no existen estudios al respecto. Las primeras (y únicas) investigaciones realizadas acerca de la precipitación salina y formación de incrustaciones en destiladores solares, y que le anteceden al presente, son: Armendáriz, et al. (2003). Comportamiento isotérmico de la precipitación salina en un destilador solar experimental. *Journal of the Mexican Chemical Society*, vol 47, núm. 3, julio-septiembre, pp. 287-294 efectuada a una temperatura de 50 °C; y Armendáriz, et al. (2005). Estudio de la Precipitación de Carbonato de Calcio en un Destilador Solar Experimental. *Revista Internacional de la Contaminación Ambiental*. 21(1) 515. Esta investigación se efectuó a una temperatura de trabajo de 60 °C.

El presente trabajo de investigación, el cual se realiza a la máxima temperatura de operación de estos dispositivos tecnológicos, esto es, a 75 °C en operación isotérmica, siendo otro trabajo investigativo que se agrega a los anteriores.

Por ende, existe un vacío en el conocimiento de lo que sucede respecto a la formación de incrustaciones. Por ejemplo: ¿Qué tipo de sales se forman a esta temperatura de trabajo (75 °C)? ¿En cuánto tiempo se estabiliza la reacción de precipitación salina? ¿Cuánta cantidad de calcio soluble reacciona en cada tiempo de muestreo? ¿Qué fase cristalina tienen las sales formadas por la reacción de precipitación salina? ¿Qué porcentajes del precipitado total corresponden a cada uno de los compuestos? ¿Qué otro fenómeno puede ser detectado cualitativamente en la fase experimental?, entre otras cuestiones.

Los estudios que mencionan la problemática de la precipitación salina y formación de cristales en el evaporador son: Zachritz et al. (2000), quienes reportan observaciones realizadas en junio, cuando la insolación incidente fue de 1280 Watts/m², puntualizando que un alambique con una

alta deposición de minerales reflejaba casi 500 Watts/m². Es decir, se perdía un 39 por ciento de la energía proveniente del sol. Por contraparte, una base limpia y negra reflejaba solo 85 Watts/m². Esto es, solamente un 6 por ciento de pérdida de energía solar. Este fenómeno tiene un efecto directo en aproximadamente el 20 por ciento de la producción.

Kemmer (1994) hace referencia a que, para transferir calor de manera eficiente con bajos gradientes de temperatura, las superficies del evaporador deberán mantenerse libres de depósitos, los cuales producen un efecto aislante. Asimismo, puntualiza que la precipitación tiene lugar en forma de incrustaciones (sales de calcio, magnesio y sílice) sobre las superficies de transferencia de calor, las cuales ocasionan una disminución de la velocidad de transferencia de calor, retardo en la evaporación y, por consiguiente, una reducción de la eficiencia térmica.

Uno de los problemas críticos en la operación de los destiladores solares de Puerto Lobos, Sonora, fueron las incrustaciones de sales y el crecimiento de estas (Cabanillas et al., 1995), a pesar de un adecuado lavado de la salmuera (Cabanillas y Montaña, 1995). Asimismo, Armendáriz (1999) menciona que, empleando agua subterránea con alto contenido de calcio como agua a tratar en estos sistemas, la formación de incrustaciones en la base del evaporador es un factor limitante en la producción de agua purificada en destiladores solares.

Por otro lado, una de las principales características en la zona de Matehuala es que el agua presentó un alto contenido en sales disueltas. Debido a eso, se formaron rápidamente incrustaciones en la base del evaporador, por lo que fue necesario un servicio de mantenimiento para limpiar tales sales acumuladas. Por esto, se ha recomendado a los usuarios lavar diariamente el destilador con agua (Ojinaga y Foster 2001).

Tampoco existe en la literatura información relativa a la formación de capas de cristales flotantes en el afluyente, mientras se llevaba a cabo la fase experimental en el destilador experimental, por lo que es el primer reporte de este fenómeno, siendo detectado visualmente.

Adicionalmente, existen varios aspectos que necesitan ser investigados. El análisis de la precipitación de calcio soluble con otros minerales solubles es un aspecto muy importante y del cual se sabe poco, más aún en agua subterránea, donde existen varios iones en solución (Kladi et al., 2000). El efecto de estos en la precipitación y en su cinética es desconocido. Se pueden hacer

aproximaciones teóricas mediante el uso de sistemas de equilibrio termodinámico entre especies (Parkhurst y Appelo, 2001), pero la interrogante es conocer qué tan reales serían tales cálculos, especialmente en sistemas donde el polimorfismo es un importante factor, como es el caso del carbonato de calcio (Koutsoukos y Kontoyannis, 1984; Xyla et al., 1989).

El objetivo principal de este estudio se centra en la determinación del comportamiento de la precipitación del calcio a una temperatura constante de 75 °C en un destilador solar a escala experimental.

De igual forma, se pretende comparar de las cantidades precipitadas de calcio soluble en el destilador libre de incrustaciones con respecto al destilador con incrustaciones previamente formadas para conocer la influencia de estas en la velocidad de la formación de las sales en la base del evaporador.

También, tiene como propósito la identificación del tipo de compuestos formados en la incrustación y las fases cristalinas de las sales que resultaron como producto de las reacciones de conllevan a la precipitación salina por medio de la técnica de difracción de rayos X, así como su morfología a través de la técnica de microscopía electrónica de barrido.

Otro objetivo es precisar los porcentajes de cada uno de los compuestos precipitados por medio de las técnicas analíticas que correspondan a los compuestos encontrados en la incrustación.

Además, el conocimiento generado en esta investigación proporciona una perspectiva más acertada de la solución de esta problemática.

METODOLOGÍA

Enfoque de la investigación: cuantitativo y cualitativo. Por tanto, es mixto.

El tipo de investigación: exploratoria y explicativa.

El diseño utilizado en la investigación: observacional y experimental.

Universo de estudio: destiladores solares de una vertiente.

Selección de muestra a estudiar: agua subterránea que alimenta a la red de suministro de agua potable a la Ciudad de Ojinaga, Chihuahua.

Sistema de muestreo: muestro intencional o de conveniencia.

Consideraciones éticas, los Criterios de Inclusión y Exclusión; y las limitaciones si fuese el caso

Consideraciones éticas: El presente trabajo de investigación científica se realiza asegurando el avance del conocimiento, la comprensión y mejora de la condición humana y el progreso de la sociedad. Para ello, se enfoca en el respeto a la dignidad del ser humano, a la autonomía de su voluntad, así también la protección, privacidad y/o confidencialidad de sus datos, bienestar animal y preservación del medio ambiente.

De igual manera, el estudio se apega a la normativa vigente y con respeto a los principios, compromisos y exigencias bioéticas y de bioseguridad.

Criterios de inclusión: dimensiones del dispositivo tecnológico, ángulo de inclinación del condensador, la distancia entre el condensador y la base del evaporador en la distancia longitudinal del evaporador, materiales y forma de la estructura y las consideraciones del aislante térmico. Asimismo, el material y la coloración de la base del evaporador.

Criterios de exclusión: utilizar el objeto de estudio, en este caso la muestra de agua subterránea, del mismo pozo de agua.

Diseño y Construcción de un Destilador Solar a Escala Experimental

El destilador solar a escala experimental empleado en los experimentos, y que se muestra en la Figura 2, se basó en el diseño de los denominados “de una vertiente” o “de una pendiente”, con un ángulo de inclinación del condensador de 4 grados. El evaporador de acero inoxidable tiene una dimensión de 0.615 m de largo, 0.32 m de ancho y 0.055 m de altura media. El área superficial resultante es de 0.197 m². Esta área corresponde, en proporción aproximada, a un destilador de campo, que generalmente es de 2.0 m² (Foster y Cormier, 1999).

En relación con altura media d (la distancia entre la base del evaporador y el condensador cuando la longitud es la mitad) fue establecida con base en los estudios efectuados por Porta (1997), en los que encontró la menor distancia d que es posible tener desde el punto de vista constructivo para un destilador solar de una pendiente, al notar un incremento en la velocidad del fluido cuando d disminuye hasta 55 mm, con lo que se obtuvieron las producciones máximas reportadas. De igual manera, encontró que el ángulo más adecuado para el condensador es de 4 grados, suficiente

para crear una inestabilidad entre las distintas celdas convectivas porque solo la periferia del vórtice participa en la transferencia de masa debido a que las partes centrales de los vórtices nunca tocan ni al evaporador ni al condensador. En la Figura 2 se muestra el prototipo experimental.

Figura 2. Vista lateral del destilador solar a escala experimental. a) Garrafones con agua subterránea; b) entrada del agua de alimentación; c) vidrio; d) manguera de lavado de salmuera; e) termómetros; f) orificio para tomar muestras; g) recipiente de captación del destilado; h) control de temperatura de la parrilla eléctrica; j) turbina para la convección de aire caliente.



Para realizar los experimentos a la temperatura de trabajo, se utilizó una parrilla eléctrica marca Themolyne, con una longitud de 0.61 m de largo y 0.32 m de ancho y 0.055 m de altura media, completando un área de calentamiento del evaporador de 0.195 m², la cual mantenía la temperatura constante de la muestra de agua subterránea dentro del prototipo. El condensador utilizado es vidrio comercial con un grosor de 3 mm.

Con la finalidad de asegurar la temperatura de trabajo de manera permanente del agua dentro del prototipo a 75 °C, se aíslan la base del evaporador y la parrilla eléctrica por medio de una cabina de policarbonato transparente de 2.5 mm de espesor. La turbina mueve el aire que se encuentra entre la base de la parrilla y el evaporador. La distancia entre estos es de 5 cm. Mediante dos termómetros se monitorea la temperatura de trabajo y las variaciones en cada temperatura de trabajo por rango de error del sistema de convección de aire caliente es de +/- 1 °C.

El destilador solar experimental de una pendiente en funcionamiento se puede observar en la Figura 3. Se puede ver el agua condensada en el vidrio fluyendo hasta el canal recolector del destilado.

Figura 3. Vista superior del prototipo experimental en funcionamiento.



Material de Trabajo

En los experimentos realizados en este estudio, se empleó agua subterránea que suministra agua potable a la población de la ciudad de Ojinaga, Chihuahua.

La muestra para analizar se obtuvo de la red de suministro de agua potable de una vivienda ubicada en el centro de la ciudad de Ojinaga, Chihuahua.

Esta ciudad está localizada en el noreste del estado de Chihuahua, en una zona semi-desértica y tiene las condiciones climáticas ideales para la implementación de la tecnología de destilación solar, ya que en verano las temperaturas fluctúan entre los 20 y 50 °C y la intensidad de la radiación solar llega hasta 900 Watts/m² (Armendáriz, 1999).

Las características de la composición química del agua subterránea utilizada en esta investigación se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del agua subterránea

Parámetro físicoquímico	Resultado (muestra de agua subterránea)	Límites máximos permitidos por la NOM-127-SSA1-2021
pH	7.50	6.5 – 8.5
Sólidos totales	2036 mg/L	1000 mg/L
Conductividad eléctrica	2010 microS/cm	1000 microS/cm
Calcio soluble	243 mg/L	
Magnesio soluble	30 mg/L	
Alcalinidad total	292 mg/L	-
Dureza cálcica	607 mg/L	
Dureza magnésica	75 mg/L como CaCO ₃	
Dureza total	682 mg/L como CaCO ₃	500 mg/L
Sulfatos	1025 mg/L	400 mg/L
Sodio	382 mg/L	200 mg/L
Potasio	28 mg/L	-
Fluoruros	3.0 mg/L	1.0 mg/L
Cloruros	167 mg/L	250 mg/L

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021: Agua para uso y consumo humano, los límites permitidos de las características químicas, en cuanto a la calidad del agua para consumo humano, los parámetros de dureza total, sulfatos, conductividad eléctrica, fluoruros y sodio, están excedidos en el agua subterránea, que a su vez se suministra a la red de abastecimiento público en la ciudad de Ojinaga, Chihuahua.

La clasificación en la escala de dureza se presenta en la Tabla 2 y es significativa la diferencia del valor de dureza entre la composición del agua subterránea y el límite máximo permisible por la NOM-127-SSA1-2021, quedando dentro de la clasificación como muy dura.

Tabla 2. Clasificación de la dureza del agua.

Dureza (mg/L como CaCO₃)	Clasificación
0 – 100 mg/L	Blanda
101 – 300 mg/L	Moderadamente dura
301 – 500 mg/L	Dura
501 en adelante	Muy dura

El límite máximo permisible de dureza total en el agua para consumo humano es de 500mg/l. Por esa razón, es necesario un proceso de ablandamiento y así, producir agua con características químicas aceptables para su uso y consumo humano, establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021.

Fase Experimental

La máxima producción de destilado se produce cuando se utiliza una altura de agua en destiladores solares, no mayor a 1 cm en el evaporador; esto, según investigaciones realizadas por Almanza (1994) y Mc Cracken (1990). Por esa razón, en la fase experimental se utilizaron 2 litros del afluente, con la finalidad de cubrir el espesor de 1 cm de altura en el destilador experimental. Posterior a ello, se aumentó la temperatura del agua a destilar, a partir de la temperatura ambiente, hasta la temperatura de trabajo (75 °C), por medio de la parrilla eléctrica, y se mantuvo constante a lo largo del periodo de muestreo. Esta temperatura es una de las máximas a la que operan los alambiques solares en campo en verano y en zonas desérticas (Zachritz et al., 2000).

Se realizaron dos tipos de experimentos a temperatura constante de 75 °C por un periodo de 5 horas, pero con 4 horas de trabajo debido a que se emplea una hora en alcanzar la temperatura de operación. El primer ensayo se efectuó con el evaporador limpio, es decir sin precipitado o incrustaciones previamente formadas. La segunda fase experimental se llevó a cabo con incrustaciones previamente formadas en el prototipo experimental con varias corridas, a la misma temperatura, para determinar la influencia del precipitado, debido al efecto conocido como nucleación, y medir la cantidad de sales que se forman en cada hora operativa por las sales incrustadas inicialmente.

Una vez puesto a punto el prototipo experimental y alcanzada la temperatura, se tomaron 5 muestras por un periodo de 5 horas. En cada hora se extraía una muestra de 15 ml para precisar la concentración de calcio soluble en el evaporador. El volumen total extraído por las muestras se sumó al volumen obtenido del destilado para mantener la cantidad en el balance del agua tratada sin alterarla.

Para ello, se realizó un promedio de los valores obtenidos en 6 ensayos experimentales con el objeto de obtener una mejor precisión de los resultados. De esta manera, se determinó el avance de la reacción de precipitación salina.

Posteriormente, se elimina la salmuera y, después de haberse secado el precipitado, se observan los cristales por medio de microscopía electrónica de barrido para observar su morfología.

Finalmente, por difracción de rayos X, se determinaron los compuestos formados y su fase cristalina.

Medición de la Concentración de Calcio Soluble

Las muestras de salmuera fueron digeridas con 5.5 ml de HCl concentrado (grado analítico) en la parrilla eléctrica a 65 °C por una hora. Después, la solución se llevó a un matraz aforado de 100 ml y se le adicionaron 0.3 gr de KCl a cada una de las muestras. Por último, la concentración de calcio soluble fue medida en un espectrofotómetro de absorción atómica (EAA) marca Avanta GBC, mediante la flama de óxido nitroso-acetileno, y se realizaron tres repeticiones por muestra, de las cuales se obtuvo un promedio de cada una.

Determinación de las Cantidades de CaCO₃ Precipitado

El destilado presenta < 1 ppm de calcio soluble, de acuerdo con el promedio de las mediciones efectuadas por medio de espectrofotometría de absorción atómica. El balance de calcio precipitado se calcula mediante la ecuación 1.

$$Cap = Cai - Cat \dots \dots \dots (ecuación 1)$$

en el que *Cap* es la cantidad en miligramos de calcio precipitado a un tiempo *t*; *Cai* es la cantidad inicial en miligramos de calcio soluble y *Cat* es la cantidad de calcio en solución, determinado por la ecuación 2.

$$(C) X (V) = Cat \dots \dots \dots (ecuación 2)$$

donde *C* es la concentración de calcio soluble en la salmuera y *V* es el volumen de destilado obtenido en ese lapso.

Por medio de la ecuación 3, se resta *Cat* de *Cai* y se determina la cantidad de calcio precipitado *Cap*.

$$Cai - Cat = Cap \dots \dots \dots (ecuación 3).$$

El balance de calcio proporciona la cantidad precipitada como calcio soluble o iónico, pero este se convierte a carbonato de calcio por medio de la ecuación 4, utilizando el valor del peso molecular del Ca soluble (PM Ca) y del carbonato de calcio (PM CaCO₃).

$$mg CaCO_3 = \frac{mg Ca soluble}{(PM Ca)} X (PM CaCO_3) \dots \dots \dots (ecuación 4).$$



Desviación Estándar de los Datos Experimentales

La desviación estándar media, σ_n , para las cuatro pruebas de los datos de las cantidades precipitadas de sales de calcio, fue determinada usando la ecuación 3, tal y como se describe en la literatura (Brownlee 1965).

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum x^2 - (\sum x)^2 / n}{n}} \dots\dots\dots(\text{ecuación 5}).$$

donde x son datos y n es el número de muestras analizadas. La desviación estándar media de la fluctuación en la concentración de calcio en la solución, las cantidades restantes de calcio soluble en el afluente y la cuantía de las sales de calcio fue de $\pm 2\%$.

En la fase experimental, las técnicas utilizadas para la interpretación de los resultados fueron las siguientes:

Determinación de calcio soluble. La concentración de calcio soluble a través del tiempo fue medida con un espectrofotómetro de absorción atómica marca Avanta GBC, mediante la flama de óxido nitroso-acetileno.

Identificación del precipitado y de los cristales depositados sobre la solución. Para identificar las especies precipitadas y su fase cristalina se utilizó la técnica de difracción de rayos X (DRX), con un difractómetro Siemens D5000, equipado con un monocromador curvo de grafito que emplea radiación $\text{CuK}\alpha$ de $\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$, con un funcionamiento de 43 kV y 30 mA.

Morfología del precipitado y de los cristales depositados sobre la solución. La morfología del precipitado y de los cristales depositados sobre la salmuera fueron observadas mediante un microscopio electrónico de barrido (MEB) modelo JEOLJSM5800 LV.

Predicción teórica-termodinámica de las sales precipitadas por medio del programa informático PHREEQC (Versión 2). Para la determinación teórica de los precipitados termodinámicamente más estables, se hizo uso del software PHREEQC en su Versión 2 y fue diseñado para efectuar una amplia gama de operaciones y cálculos geoquímicos a temperaturas



relativamente bajas. Está elaborado en lenguaje de programación C, el cual está basado en un modelo de asociación de iones en soluciones acuosas.

Para tal efecto, se introdujeron los valores de la composición química del agua subterránea que se utilizó como afluente en esta investigación y se exhiben en la Tabla 1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Datos del Comportamiento de la Precipitación de Calcio

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos del promedio de 6 corridas experimentales con el evaporador libre de incrustaciones.

Tabla 3. Resultados de las cantidades precipitadas de CaCO_3 durante 4 horas de operación.

Muestra	Destilado (ml)	Volumen total extraído (ml)	Volumen de la salmuera (L)	Calcio soluble en solución en ppm	Ca_i (mg)	Ca_p (calcio precipitado total)	% pptado. en forma de CaCO_3
Ca_i			2.0	244	488		
M 1	90	105	1.895	236.04	447.3	40.7	19.72
M 2	180	285	1.715	210.00	360.15	90.68	43.94
M 3	164	464	1.536	205.00	314.88	45.27	21.93
M 4	158	637	1.363	214.37	292.18	22.7	11
M 5	150	802	1.198	238.07	285.20	7.00	3.39
					TOTAL	206.35	99.98%

Concentración del afluente a tiempo inicial Ca_i , M 1= muestra tomada al alcanzar 75°C (1 hora).

Volumen total extraído del prototipo es igual al destilado + 15 ml de muestra en cada periodo.

M2 a M5 corresponden a las muestras tomadas en cada hora.

En la Tabla 4 se muestran los resultados del promedio de 6 ensayos con incrustaciones en el evaporador.

Tabla 4. Resultados de la precipitación en forma de CaCO_3 en un periodo de 4 horas.

Muestra	Destilado (ml)	Volumen total extraído (ml)	Volumen de la salmuera (L)	Calcio soluble en solución en ppm	Ca_i (mg)	Ca_p (calcio precipitado total) mg	% pptado como CaCO_3
Ca_i			2.0	243	486		
M 1	85	100	1.900	217.50	413.25	72.75	34.5
M 2	172	272	1.728	195.50	337.80	75.45	35.80
M 3	155	442	1.558	194.06	302.34	35.4	16.78
M 4	152	609	1.391	204.35	284.25	18.09	8.60
M 5	148	772	1.228	224.01	275.08	9.17	4.34
					TOTAL	210.86	99.99%

Concentración del afluyente a tiempo inicial Ca_i , M 1= muestra tomada al alcanzar 75°C (1 hora).

Volumen total extraído del prototipo es igual al destilado + 15 ml de muestra en cada periodo.

M2 a M5 corresponden a las muestras tomadas en cada hora.

Los datos obtenidos y plasmados en ambas tablas son: variación de la concentración de calcio soluble inicial en la salmuera, las cantidades remanentes de calcio soluble, las cantidades precipitadas como calcio total y el porcentaje precipitado en cada hora, el cual se calculó dividiendo la cantidad precipitada en cada hora, entre la cantidad total precipitada como calcio total.

Caracterización del Precipitado por DRX

Para identificar los cationes y aniones que reaccionaron en la solución acuosa, se realizó un análisis de la incrustación por medio de la técnica de difracción de rayos X. Para tal efecto, se llenó el alambique y se mantuvo en funcionamiento durante 12 horas a la temperatura de operación de 75°C .

Posteriormente, se retiró la salmuera. Este procedimiento se realizó para recolectar suficiente sedimento para analizar por DRX en un tiempo aproximado de 2 semanas.

El análisis mostró que la incrustación está formada por carbonato de calcio (CaCO_3), sulfato de calcio (CaSO_4) y sulfato de calcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5 \text{H}_2\text{O}$) y la fase cristalina de las sales precipitadas estuvo compuesta principalmente por calcita con sistema de cristalización romboédrica, anhidrita en sistema cristalino ortorrómbico, en la clase bipiramidal rómbica y basanita con sistema cristalino ortorrómbico respectivamente, tal y como se observa en la Figura

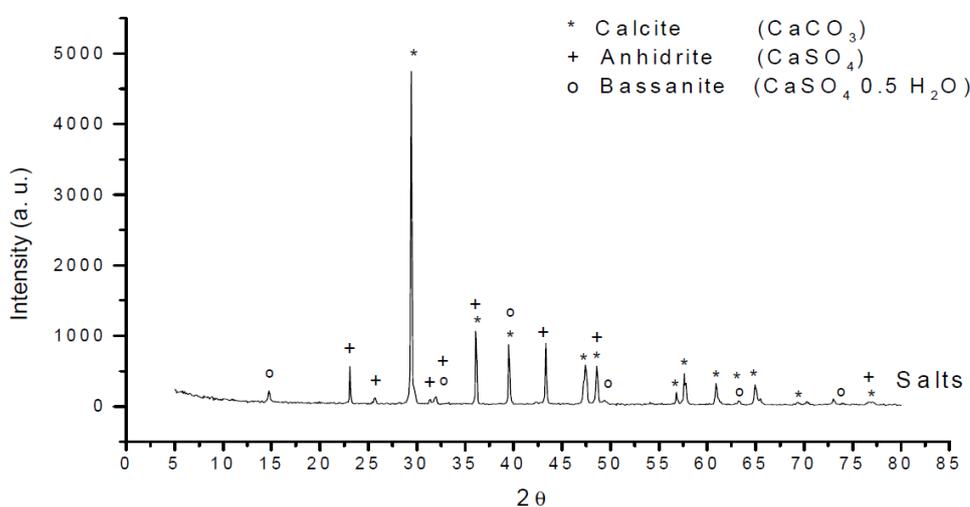
5. Las mismas sales y fases cristalinas se encontraron en las capas salinas que se formaron sobre la salmuera.

Porcentaje de las Sales Precipitadas en Función de su Composición Química

Con el propósito de determinar los porcentajes de cada sal formada en la incrustación, se realizó un análisis por medio de termogravimetría, el cual mostró un 80% de carbonato de calcio y un 4% de humedad en la muestra.

Por medio de la técnica de precipitación por sulfato de bario, se determinó que había un 14.5% de calcio en forma de sulfato de calcio. También se encontró un 1% de material insoluble.

Figura 5. Resultado del análisis por la técnica de difracción de rayos X (DRX).



Morfología de los Cristales por MEB

La micrografía que se muestra en la Figura 6 se observa a la calcita, la más abundante de las sales, tanto como incrustación en la bandeja del destilador solar experimental, como en la superficie de la salmuera.

Figura 6. Micrografía Electrónica de Barrido que muestra un acercamiento los cristales de calcita para apreciar su morfología

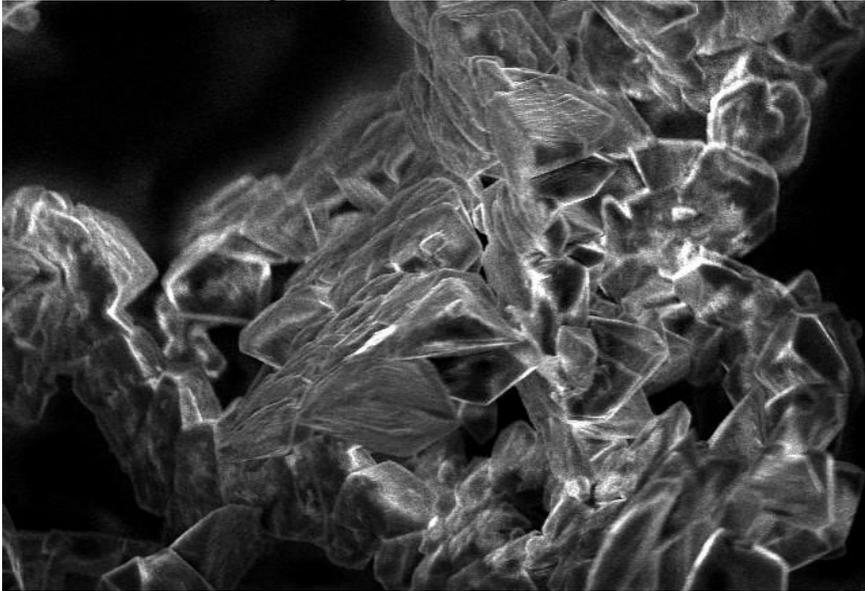
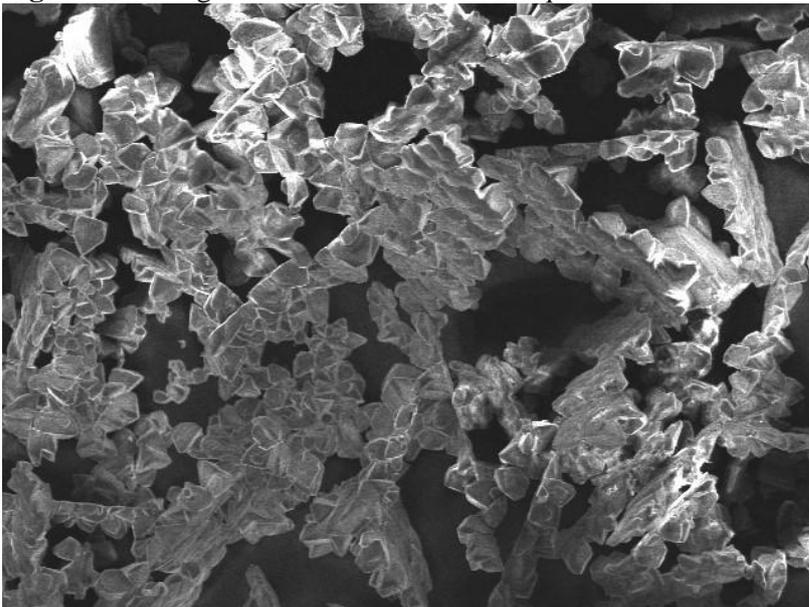


Figura 7. Micrografía electrónica de barrido que exhibe la formación longitudinal de la calcita



DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se aprecia en las Tablas 3 y 4, los ensayos experimentales muestran que la estabilización de la reacción de precipitación de carbonato y sulfato de calcio ocurre en la tercera hora de operación debido a que la cantidad de calcio soluble total se incrementa en la tercera y cuarta hora, lo que sugiere que el calcio soluble no reacciona y se va concentrando mientras ocurre el

proceso de destilación y disminuye el volumen del agua tratada. Este hecho también se corrobora con las cantidades de calcio precipitados en la tercera y cuarta hora, ya que prácticamente es mínima la cantidad de calcio total precipitado este periodo.

Como se observa en la Tabla 3, la mayor parte del calcio soluble reaccionó en la primera hora de operación, con un 44%. Pero si tomamos en cuenta que el 20% reaccionó al alcanzar la temperatura de trabajo, entonces el total de calcio soluble que precipitó en la primera hora fue de un 64%, en la segunda hora un 85.6% y un 96.6% en la tercera.

Por lo anterior, se determina que las reacciones de precipitación salina se estabilizan a la tercera hora de operación a 75 °C. Lo anterior contrasta con los resultados obtenidos por Armendáriz et al. (2003) en cuanto a que la estabilización de la reacción de precipitación de CaCO_3 a 60°C sucede hasta la sexta hora. A 50°C la estabilización de la reacción de precipitación de CaCO_3 se alcanza con más de 11 horas de tratamiento isotérmico (tiempo en el cual fue el último muestreo y todavía proseguía la formación de carbonato de calcio).

Además, una vez que se forma la incrustación salina, la velocidad de la reacción de precipitación se incrementa drásticamente, tal y como se puede observar y comparar el valor obtenido en la primera hora de trabajo sin incrustaciones en el evaporador (40.7%) con respecto a la primera hora de trabajo con incrustaciones previamente formadas en la base del destilador experimental, donde el calcio soluble reaccionado fue de 72.75%. Esto es, un 78% más rápido.

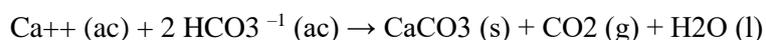
Lo anterior debido a que, una vez que se depositan las sales en el evaporador, estas sirven para que se lleve a cabo la nucleación y su efecto se traduce en que se incrementa la generación y crecimiento de nuevos cristales (Encyclopedia of Desalination and Water Resources, 2001).

Cabe resaltar que en la época de primavera-verano, donde las temperaturas de esa zona desértica de la ciudad de Ojinaga, Chih, y en general de todo el norte del estado de Chihuahua, México, oscilan entre los 20 °C hasta los 50 °C (CONAGUA, 2023). En ese sentido, a mayor temperatura, se incrementa la velocidad de las reacciones iónicas que dan origen a la precipitación salina y a la formación de capas de cristales blancos en la superficie del afluente. Al mismo tiempo, debido a que en la época de verano esta ciudad y zonas aledañas se presentan las temperaturas más altas de México, se tiene un gran potencial para la implementación de esta tecnología.

Tomando en cuenta los resultados de las cantidades de calcio precipitado y las fases cristalinas encontradas, tanto en experimentos con evaporador libre de precipitado como en ensayos con incrustaciones formadas previamente, se infiere que las reacciones de precipitación salina no son isotérmicas, sino que están impulsadas por gradientes de temperatura.

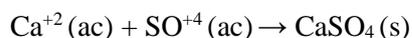
La temperatura al interior de los destiladores solares se encuentra alrededor de la temperatura de trabajo de esta investigación (75 °C), según previos estudios (Zachritz et al., 2000). Lo anterior es otro motivo por la cual se fundamenta la importancia de efectuar la fase experimental a esta temperatura de operación.

Las fases cristalinas resultantes del análisis por difracción de rayos X, tanto en los cristales formados sobre la solución como en la incrustación en el evaporador del destilador a esta temperatura de trabajo fueron calcita, anhidrita y basanita. A diferencia de los resultados a 50 y 60 °C reportados por Armendáriz et al. (2003) y Armendáriz et al. (2005), la única sal encontrada fue carbonato de calcio (CaCO₃) en la forma cristalina de calcita. La reacción química del calcio soluble (Ca⁺⁺) con los iones bicarbonato, es la siguiente:



El sulfato de calcio anhidro o anhidrita (CaSO₄), en unión con el sulfato de calcio hemihidratado o basanita (CaSO₄.1/2H₂O), representó un 14.5% en el precipitado respecto al experimento con incrustaciones previamente formadas en el prototipo experimental.

La ecuación química que expresa la formación de CaSO₄ en forma de anhidrita y que se produce en el sistema de investigación es la siguiente:



La reacción química que sucede en el prototipo experimental respecto de la formación de basanita o sulfato de calcio hemihidratado (CaSO₄.0.5H₂O) se representa con la siguiente ecuación química:



Por otra parte, en esta investigación se efectuó un estudio teórico con los valores de la composición química del agua subterránea que se muestran en la Tabla 1 mediante el programa de cómputo PHREEQC (Versión 2), desarrollado por Parkhurst y Appelo (2001) para predecir

los sólidos termodinámicamente más estables, los cuales resultaron en correspondiente orden: aragonita, calcita, dolomita y vaterita. Dichos resultados difirieron en gran manera de los encontrados en este estudio.

Niu et al. (2022), señalan que el CaCO_3 cristalino exhibe tres polimorfos: vaterita hexagonal, aragonita ortorrómbica y calcita romboédrica, en orden de estabilidad termodinámica creciente. En ese sentido, el CaCO_3 se ha encontrado la fase cristalina en forma de calcita, tanto en los dos estudios anteriores de Armendáriz et al. (2003) a $50\text{ }^\circ\text{C}$ y de Armendáriz et al. (2005) a $60\text{ }^\circ\text{C}$ como en el presente ($75\text{ }^\circ\text{C}$), lo cual concuerda con lo señalado por Niu et al. (2022).

Con estos estudios, se demuestra experimentalmente que se puede seleccionar la formación de CaCO_3 en forma de calcita, anhidrita y basanita a temperaturas entre los $60\text{ }^\circ\text{C}$ y $75\text{ }^\circ\text{C}$.

Por otra parte, es importante señalar que la formación de capas de cristales sobre la solución conlleva a una implicancia desfavorable en la productividad, debido a que, en campo, la reflectividad de la radiación solar en los destiladores solares comienza antes de llegar al fondo del evaporador, por lo que la reflectividad ocurre con mayor significancia. Esto debido a que, a la formación de incrustaciones, se le suma la de las capas de cristales blancos sobre el afluente. Por ende, ambos factores (la formación de cristales en la solución y de incrustaciones), influyen más significativamente y de forma negativa en la eficiencia de estos sistemas purificadores de agua y su vida útil.

La utilidad de los destiladores solares en zonas desérticas de la entidad se ve justificada, ya que el agua de pozo o agua subterránea que pueden ser fuente de agua apta para consumo humano, pero sobrepasan los límites de la norma oficial mexicana ya sea por contenido de dureza total, fluoruros, sulfatos y cloruros, metales pesados o sustancias tóxicas para la salud.

No obstante, para que sea efectiva esta tecnología de la destilación solar, es necesario prevenir o eliminar el problema de la formación de incrustaciones en estos dispositivos tecnológicos. Una posibilidad es el uso de inhibidores de la precipitación de CaCO_3 y CaSO_4 , que sean aprobados para el uso de la potabilización del agua, con alta efectividad y que sean amigables con el medio ambiente.

Por otra parte, de acuerdo con la revisión de literatura, se puede sugerir que el consumo de aguas muy duras, en general de más de 200 a 300 mg/L, aumenta el riesgo de litiasis renal (Alvarado et al., 2000; Mora et al., 2000; Medina et al., 2002; Alvarado et al., 2007; León, 2008; Cotruvo y Bartram, 2009; Reyes, 2019), por lo que es otra justificación para ablandar el agua por medio de la tecnología de destilación solar, ya que la dureza total del afluente en este trabajo de investigación es de 682 mg/L.

Debido lo antes expuesto, en el presente trabajo se propone una combinación de agua destilada por el destilador solar con agua subterránea con la finalidad de promover la salud con las cantidades suficientes y necesarias de calcio.

La mezcla óptima para tal efecto es de 70% de agua destilada y 30% de agua subterránea en términos de volumen de agua. Este volumen total tiene 218 mg/L de dureza total.

Lo anterior es otro aporte al estado del conocimiento sobre destilación solar en la región desértica del estado de Chihuahua, en cuanto al equilibrio moderado de calcio y magnesio necesario para la salud y al mismo tiempo, se logra un aumento en el volumen de agua producido, el cual es adecuado para cocinar, lavar utensilios de cocina u otros similares, y apta para consumo humano, además de otras actividades, siempre y cuando el agua subterránea como la del municipio de Ojinaga no contenga metales pesados u otras sustancias que sean tóxicas. Igualmente, contaminantes que sobrepasen los límites permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021.

Respecto al fenómeno de la formación de cristales sobre la solución en el funcionamiento de un destilador solar, incluso a bajas temperaturas de trabajo, es un hecho no reportado en la literatura. Por esto, se abre la puerta para otro estudio en cuanto al conocimiento del porqué ocurre ese fenómeno.

CONCLUSIONES

En los ensayos realizados con el evaporador libre de cristales de sal incrustadas en la base del evaporador, el calcio soluble que precipitó en la primera hora fue de un 64% y en la segunda hora un 85.6% y 96.6% en la tercera.

En relación con los experimentos realizados con incrustaciones previamente formadas, la velocidad de la reacción del calcio soluble total fue un 82% más rápida en la primera hora de operación, ya que, comparativamente, el 40% del calcio soluble reaccionó en un destilador libre de incrustaciones en la primera hora de trabajo y con incrustaciones previamente formadas en la base del destilador experimental, el calcio soluble total reaccionó el 72.75%. Entonces, la previa formación de incrustaciones hace que la reacción del calcio total soluble se duplique. Esto significa que una vez que comience la reacción de precipitación salina en el destilador y se formen los primeros precipitados, la reacción se duplicará al alcanzar la temperatura de 75 °C, originando que la formación de incrustaciones sea más rápida y en mayor cantidad.

Por lo anterior, se concluye que la reacción de precipitación salina no es isotérmica, sino que está impulsada por gradientes de temperatura.

Las sales que se formaron en la incrustación son: carbonato de calcio (CaCO_3), la cual se precipitó en la fase cristalina de calcita con una composición del total de 80% y sulfato de calcio en fase cristalina de anhidrita CaSO_4 y basanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) en conjunto, con un 14.5%.

Se demuestra experimentalmente que se puede seleccionar la formación de CaCO_3 en forma de calcita, CaSO_4 en forma de anhidrita y basanita a una temperatura de 75 °C en condición isotérmica.

El estudio teórico con los valores de la composición química del agua subterránea de la Ciudad de Ojinaga, efectuado con el programa de cómputo PHREEQC (Versión 2), para predecir los compuestos termodinámicamente más estables, arrojó que se formarían en correspondiente orden: aragonita, calcita, dolomita y vaterita.

Dicha predicción fue muy distinta a los resultados encontrados en este estudio, ya que las fases cristalinas de las sales incrustadas fueron calcita, anhidrita y basanita. Ello debido a que los precipitados de las fases cristalinas que se obtienen dependen en mayor significancia del tipo de afluente, es decir, de la composición química del agua. Por esta razón, los resultados encontrados experimentalmente en este estudio son más exactos. Eso significa que, mediante ensayos, es la única forma de conocer la fase cristalina de las sales precipitadas con este tipo de estudios.

Se concluye que las reacciones de precipitación salina ocurren con rapidez, ya que se estabilizan a la tercera hora de operación en el prototipo experimental y por esa razón, se forman incrustaciones rápidamente y de manera abundante, lo cual afecta de forma negativa en la operatividad y productividad de los destiladores solares en campo, impidiendo la implementación de estos dispositivos para su uso en comunidades rurales.

Por tanto, es imprescindible encontrar la solución a esta problemática para que la destilación solar pueda ser una tecnología aplicable a comunidades rurales que tienen como suministro de agua, pozos con las características fisicoquímicas similares a las del agua subterránea, asociadas a las favorables condiciones climáticas y a la alta incidencia de la radiación solar que caracteriza al Municipio de Ojinaga, Chih.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado Mora D., Herrera Alfaro, N. Portuquez Felipe, C., Brolato Peinador M. (2000). Cálculos en las vías urinarias y su relación con el consumo de calcio en el agua de bebida en Costa Rica. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 9(17).
- Almanza, R.; Muñoz, (1994). *Ingeniería de la Energía Solar*. El Colegio Nacional.
- Alvarado, Mora, A., Chamizo García, H. (2007). Estudio exploratorio-ecológico sobre las concentraciones de sales de calcio en el agua para consumo humano y la litiasis renal en Costa Rica. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 16(31).
- Armendáriz, S. I., Porta-Gándara, M. A., Foster E, R., Koutsoukos, P., Bautista G. R., Nuñez, G. (2003). Comportamiento Isotérmico de la Precipitación Salina en un Destilador Solar Experimental. *Revista de la Sociedad Química de México*, 47(3), 287-294.
- Armendáriz, S. I. (Abril de 1999). *Desalinización de agua subterránea con alto contenido iónico, mediante un sistema piloto de destilación solar*. Congreso de Investigadores del Estado de Chihuahua. Chihuahua, Chih., México.
- Badillo, D. (2023). Impacta sequía de severa a excepcional, al 51% del territorio. *El Economista*. Política. <https://www.economista.com.mx/politica/Sequia-severa-de-hoy-impactara-en-cosechas-de-2024-20231027-0109.html>.



- Cabanillas, R.E. y Montaña J. (1995). *Seguimiento técnico de la planta desaladora solar de Puerto Lobos*. Reporte Técnico (Grupo de Energía). División de Ingeniería, Universidad de Sonora, Hermosillo.
- Cabanillas R.E. y Montaña J. (1995). *Planta de destilación solar en Puerto Lobos, Sonora*. Memorias del XIX Congreso de ANES. La Paz, Baja California. Vol. 19. pp. 4755.
- CONAGUA. (2023). *Reporte anual del clima en México 2022*. [https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Diagnóstico/Atmosférico/Reporte del Clima en México/Anual2022.pdf](https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Diagnóstico/Atmosférico/Reporte%20del%20Clima%20en%20México/Anual2022.pdf)
- Cotruvo, J., y Bartram, J. 2009. *Calcium and magnesium in drinking-water: Public health significance*. Organización Mundial de la Salud. *Calcium and magnesium in drinking-water: Public health significance* Editado por J. Cotruvo y J. Bartram. Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241563550>.
- EOLSS Publishers Co. Ltd. Encyclopedia of Desalination and Water Resources (DESWARE). (2001). *Physical, Chemical and Biological Phenomena Affecting Desalination Processes. Common Foulants in Desalination: Inorganic salts*.
- Foster & Cormier M. (1999). *Solar still construction and operation manual*. El Paso Solar Energy Association. Texas State Energy Conservation Office. El Paso, Texas.
- EOLSS Publishers Co. Ltd. Encyclopedia of Desalination and Water Resources (DESWARE). (2001). *Physical, Chemical and Biological Phenomena Affecting Desalination Processes. Common Foulants in Desalination: Inorganic salts*.
- IMCO Staff. (2023). *Aguas en México: ¿Escasez o mala gestión? Centro de Investigación en Política Pública. Energía y Medio Ambiente*. <https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/>.
- Kemmer, F. N. (1994). *The Nalco Water Handbook*. Mc Graw Hill Book Co.
- Koutsoukos P. y Kontoyannis C. (1984). Precipitation of calcium carbonate in aqueous solutions. *Journal Chem. Soc., Faraday Trans. 80*, 1181-1192.
- Kladi, A.; Pavlos G.; Kepletsanis, P.; Ostvold, G.; Kontoyiannis, G.C.; Koutsoukos, P. (2000). *Crystal Growth of Calcium Carbonate in Seawater. The Effect of Temperature and of the*

Presence of Inhibitors. Advances in Crystal Growth Inhibition Technologies. Kluwer Academic/Plenum Publishers. New York.

León Hanco, W. (2008). *Impacto en la salud por consumo de agua dura en pobladores de la parte baja del río Chili, Arequipa, Perú.* Puno – Perú. Monografías.

McCracken, H. (1990). Distillate production of a simple direct solar still *Sun World*, 14(3), 83-87.

Medina-Escobedo M, Zaidi M, Real-de León E, Orozco-Rivadeneira S. (2002). Prevalencia y factores de riesgo en Yucatán, México, para litiasis urinaria. *Salud Publica Mex* 44, 541-545. <https://www.monografias.com/trabajos67/salud-consumo-agua-dura/salud-consumo-agua-dura.shtml>.

Mora, D., Alfaro, N., Portuquez F., Peinador M., (2000). Cálculos en las vías urinarias y su relación con el consumo de calcio en el agua de bebida en Costa Rica. *Revista Costarricense de Salud Pública.* 9(17).

ONU. (2024). *Agua para la paz.* <https://www.un.org/es/observances/water-day>.

ONU. (2023). *Paz, dignidad e igualdad en un planeta sano. El derecho al agua.* <https://www.un.org/es/global-issues/water#:~:text=La%20Asamblea%20reconoci%C3%B3%20el%20derecho,hogar%2C%20y%20accesible%20f%C3%ADsicamente%20>.

Niu Y. Q., Liu J. H., Aymonier, C., Fermani, S., Kralj, D., Falini, G., Zhou, Ch., Calcium carbonate: controlled synthesis, Surface functionalization, and nanostructured materials. *Chem. Soc. Rev.*, 51, 7883-7943. <https://doi.org/10.1039/D1CS00519G>.

Norma Oficial Mexicana Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.* (2022). Diario Oficial de la Federación. DOF: 02/05/2022.

Ojinaga, L. & Foster, R. E. (2001). *Experiencias en el Uso de Destiladores Solares en San Luis Potosí y Chihuahua, México.* Memorias del XXV Congreso de ANES. Octubre de 2001. San Luis Potosí, México.



ONU. (2018). *Decenio Internacional para la Acción “Agua para el Desarrollo Sostenible”, 2018-2028. Sin agua, no hay vida.*

<https://www.un.org/es/events/waterdecade/index.shtml>.

ONU. (2022). *Las aguas subterráneas pueden ser la solución a la crisis hídrica si se gestionan correctamente. Mirada global. Historias humanas.*

<https://news.un.org/es/story/2022/03/1505842>.

Organización Mundial de la Salud. (2023). *Agua para consumo humano. Información general.*

<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>.

Parkhurst, D.; Appelo, C. A. J. (2001). *Water-Resources Investigations Report. User’s guide to PHREEQC (Version 2). “A Computer program for Speciation, batch-reaction, one dimensional transport, and inverse geochemical calculations”*. U. S. Geological Survey.

Porta M. A. (1997). *Mecanismos de Transferencia en Destiladores Solares Someros*. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería, UNAM.

Reyes Tineo, W. (2019). *Influencia del consumo de agua dura de pozo sobre la salud de los pobladores del caserío Nuevo Huancabamba, Moyobamba*. Universidad Nacional de San Martín- Taraporto. Tesis de grado. <http://hdl.handle.net/11458/3379>.

Senado de la República. (2022). *Atender las Problemáticas Relacionadas con el Líquido Vital*. LXV Legislatura. Comisión de Recursos Hidráulicos. Programa de Trabajo. https://comisiones.senado.gob.mx/recursos_hidraulicos/docs/programaLXV.pdf

Toché, N. (2023). *En México, 12 millones de personas carecen de acceso a agua potable*. El Economista. Política. <https://www.economista.com.mx/politica/En-Mexico-12-millones-de-personas-carecen-de-acceso-a-agua-potable-20230322-0009.html>

Xyla A., Klepetsanis P. y Koutsoukos P. (1989). *Calcium carbonate-calcium sulfate scale formation at elevated temperatures*. Corr. Paper No. 177.

Zachritz, H., Mimbela, L., Polka, R., Stevens, K., Cisneros, L., Floyd, H., Hanson, A. (2000). *Application of solar stills for drinking water in border colonias*, SWTDI-NMSU, EDA Project No. 08-39-03086, Austin, Texas.

- Silva Herrera , G. A. (2023). La Influencia de las Redes Sociales en el Sistema Judicial. Estudios Y Perspectivas Revista Científica Y Académica , 2(1), 1-26. <https://doi.org/10.61384/r.c.a.v2i1.7>
- García Pérez , M., & Rodríguez López, C. (2022). Factores Asociados a la Obesidad y su Impacto en la Salud: un Estudio de Factores Dietéticos, de Actividad Física y Sociodemográficos. Revista Científica De Salud Y Desarrollo Humano, 3(2), 01-15. <https://doi.org/10.61368/r.s.d.h.v3i2.31>
- Ruíz Ledesma, E. F., Córdova Pérez., C., & Montiel Sánchez, A. S. (2023). Errores comunes en estudiantes universitarios al trabajar con la integral definida. Emergentes - Revista Científica, 3(2), 21-31. <https://doi.org/10.60112/erc.v3i2.29>
- Rivera, M., & Pérez, C. (2023). Factores Asociados a la Obesidad y su Impacto en la Salud: Un Estudio de Factores Dietéticos, de Actividad Física y Sociodemográficos. Sapiencia Revista Científica Y Académica , 3(2), 145-160. <https://doi.org/10.61598/s.r.c.a.v3i2.59>
- European Commission. (2023). Ethical Guidelines on the Use of Artificial Intelligence (AI) and Data in Teaching and Learning for Educators. Available online: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d81a0d54-5348-11ed-92ed-01aa75ed71a1/language-en>