

Revisión de tecnologías de recolección de agua atmosférica: Análisis bibliométrico, métodos, materiales adsorbentes, tecnologías híbridas y perspectivas para México

Lianismary Alonso Hernández¹, Carlos Agustín Poblano Salas², Manuel Gutiérrez Nava² y Luis Alberto Cáceres Díaz^{3,*}

¹ Posgrado CIATEQ, A.C., Centro de Tecnología Avanzada, Circuito Aguascalientes Norte 135, 20358 San Francisco de los Romos, Aguascalientes, México.

² CIATEQ, A.C. Centro de Tecnología Avanzada, San Agustín del Retablo 150, Constituyentes Fovissste, 76150 Santiago de Querétaro, Qro

³ SECIHTI, CIATEQ, A.C. Centro de Tecnología Avanzada, eje 126 #225, Industrial San Luis, 78395 San Luis Potosí, S.L.P.

* e-mail: luis.caceres@ciateq.mx

Resumen

La creciente escasez de agua a nivel mundial, causada por la sobreexplotación de los acuíferos, ha impulsado el desarrollo de tecnologías alternativas para el abastecimiento hídrico, como la recolección de agua atmosférica (AWH). Este artículo analiza el estado del arte de las tecnologías de AWH, integrando el análisis bibliométrico de la literatura existente, evaluación de los métodos y prototipos desarrollados, así como un enfoque sobre los avances reportados en México. Mediante el uso de la base de datos Scopus y el software VOSviewer, se realiza un análisis de co-ocurrencia de palabras clave en 315 artículos publicados entre 2020 y 2025. Los resultados revelan un crecimiento exponencial de publicaciones en los últimos años, concentrado en países como China, Estados Unidos e India. El análisis bibliométrico destaca cinco líneas principales asociadas al desarrollo de materiales adsorbentes, procesos de adsorción-desorción, condiciones ambientales y la aplicación práctica de estas tecnologías. La revisión tecnológica muestra que, mientras los sistemas de condensación activa predominan por su madurez, los basados en la sorción con materiales avanzados como MOF-801 y MOF-303 ofrecen potencial para operar en condiciones de baja humedad relativa, a pesar de los desafíos en las cinéticas de desorción. En México, el desarrollo se concentra principalmente en tecnologías comerciales de condensación, lo que refleja una carencia de investigación en sistemas híbridos y adsorbentes avanzados adaptados a las condiciones áridas y semiáridas del país. Este artículo contribuye con la integración de diversas tecnologías de AWH y sus aplicaciones actualizadas hasta 2025, así como con un aporte sobre los avances reportados en México en este campo.

Palabras clave— recolección de agua atmosférica, tecnologías híbridas, materiales adsorbentes.

Review of atmospheric water harvesting technologies: bibliometric analysis, methods, adsorbent materials, hybrid technologies, and prospects for Mexico

Abstract

The growing global water scarcity, caused by the overexploitation of aquifers, has driven the development of alternative technologies for water supply, such as atmospheric water harvesting (AWH). This article analyzes the state of the art in AWH technologies, incorporating a bibliometric analysis of the existing literature, an evaluation of the methods and prototypes developed, and a focus on the advances reported in Mexico. Using the Scopus database and VOSviewer software, a co-occurrence analysis of keywords was conducted on 315 articles published between 2020 and 2025. The results reveal an exponential growth in publications in recent years, concentrated in countries such as China, the United States, and India. The bibliometric analysis highlights five main lines of research associated with the development of adsorbent materials, adsorption-desorption processes, environmental conditions, and the practical application of these technologies. The technology review shows that, while active condensation systems predominate due to their maturity, sorption-based systems using advanced materials such as MOF-801 and MOF-303 offer the potential to operate under conditions of low relative humidity, despite challenges related to desorption kinetics. In Mexico, development is primarily focused on commercial condensation technologies, reflecting a lack of research into hybrid systems and advanced adsorbents adapted to the country's arid and semiarid conditions. This article contributes to the integration of various AWH technologies and their applications, updated through 2025, as well as providing an overview of the advances reported in Mexico in this field.

Keywords— atmospheric water harvesting, hybrid technologies, adsorbent materials.

Recibido: 23 de abril de 2026

Aceptado: 31 de julio de 2026

Disponible en línea: 5 de agosto de 2026

I. INTRODUCCIÓN

El agua, siendo un recurso fundamental para la vida, constituye una fuente de suministro doméstico, agrícola e industrial e incluso para ecosistemas en diversas partes del planeta Tierra y especialmente en regiones áridas y semiáridas [1]. A la Tierra se le conoce como el planeta azul, dado que aproximadamente el 70 % de su superficie está cubierta de agua [2]. Aproximadamente el 97,5 % del agua en la superficie terrestre es salada y el 2,5 % restante es dulce [3].

La limitada disponibilidad de los recursos hídricos representa un desafío para los países a nivel global, tal es así que el mundo ha entrado en una era de crisis hídrica global, donde el 75 % de la población mundial habita en regiones donde el agua escasea o no es apta para su consumo, más de la mitad de los grandes lagos del planeta se están secando y cerca de dos mil millones habitan sobre terrenos que se hunden debido a la sobreexplotación de las aguas subterráneas [4]. En México también se enfrenta esta crisis, caracterizada por los elevados niveles de consumo per cápita y la distribución desigual del recurso. El sector agropecuario concentra alrededor del 76.3 % del agua, mientras que el uso doméstico representa el 14.7 % [5].

Esta situación ha impulsado en gran medida el desarrollo de diversos métodos, como la ósmosis inversa, la desalinización y la purificación, como vías de solución [6]. Sin embargo, estas tecnologías han sido insuficientes para atender las necesidades de las regiones con crisis hídrica, por lo que, como un camino alternativo, el agua atmosférica es considerada una reserva importante y renovable ya que la atmósfera está compuesta por 12 900 km³ de agua dulce, donde cerca de un 98 % es vapor y el 2 % restante se concentra como agua condensada en las nubes [7].

Ante este panorama, la captación de agua atmosférica surge como una alternativa innovadora y sostenible para complementar las fuentes convencionales en regiones con escasez hídrica [2]. El objetivo principal de este artículo es analizar el estado del arte de la captación de agua atmosférica mediante una revisión de la literatura, integrando un análisis bibliométrico de la producción científica y una evaluación de los métodos y prototipos reportados, con un enfoque en los avances reportados en México.

II. MÉTODO

Para la elaboración de este artículo, se revisó la literatura internacional, principalmente publicada en periodos recientes, considerando algunos artículos de años anteriores, dada su relevancia en el tema. La búsqueda bibliográfica se basó en bases de datos como Scopus, ScienceDirect y ResearchGate, así como en sitios web relacionados con el tema. El análisis bibliométrico se realiza en el software VOSviewer, considerando un mínimo de 5 ocurrencias de las palabras clave en un total de 315 artículos publicados entre 2020 y 2025. Las palabras clave utilizadas son "Atmospheric Water Harvesting Methods". Se consideraron documentos en español e inglés y se excluyeron artículos duplicados y estudios no relacionados directamente con la temática.

En la revisión se sintetizan los avances recientes en los métodos de captación de agua atmosférica, según su clasificación. En cada subsección se describen la formación y el mecanismo de obtención y se resaltan las condiciones ambientales correspondientes. Además, se analizan diferentes diseños híbridos de captación de agua, considerando los resultados, las condiciones de operación y las limitaciones específicas. Por último, se analizan los avances en tecnologías recientes para la captación de agua atmosférica en México.

III. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

Si bien la escasez de agua hoy en día se ha convertido en una problemática mundial, la recolección de agua atmosférica se considera una vía de solución prometedora ante este reto [8].

De ahí que, en los últimos años, las tecnologías para capturar agua atmosférica hayan recibido especial atención por parte de los investigadores [8, 9], así como el intercambio de información científica en este campo. Una diversidad de estudios ha revisado en detalle los avances tecnológicos, materiales y sistemas empleados para la extracción de agua del aire, a fin de mejorar la eficiencia y la viabilidad de estas tecnologías [6, 8]. Asimismo, una gran cantidad de investigadores han estudiado distintos enfoques, incluyendo métodos de condensación, adsorción y sistemas híbridos, lo que ha facilitado ampliar el conocimiento en este campo [10, 2]. La Fig. 1 muestra el número de artículos publicados del año 2010 al 2025 en intervalos de dos años en la base de datos ScienceDirect utilizando la expresión "Atmospheric Water Harvesting" (AWH).

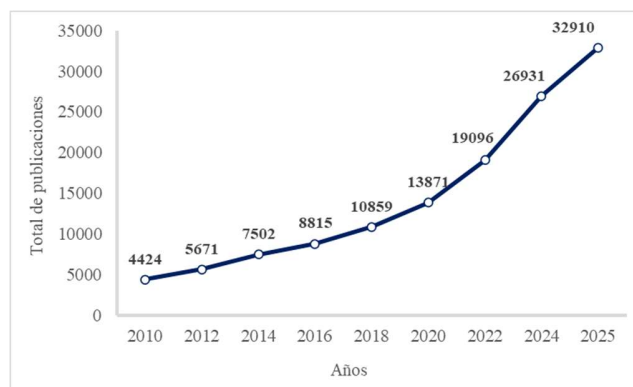


Fig. 1. Publicaciones de artículos de AWH por año.

A partir de 2020, se observa un aumento notable en la cantidad de artículos publicados, lo que evidencia el creciente interés en la recolección de agua atmosférica. Las publicaciones reflejan un incremento año tras año, más significativo entre 2022 y 2025, con un total de 32 910 artículos publicados en 2025. Esta tendencia podría relacionarse con la concientización sobre la problemática del agua, los avances tecnológicos y las nuevas aplicaciones en este ámbito [11].

Las publicaciones de 87 países entre 2020 y 2025 se muestran en la Fig. 2. Los resultados de 20 países indican que China es la región con el mayor número de publicaciones, con

605, seguida de Estados Unidos, con 231, e India, con 135 artículos publicados relacionados con la recolección de agua atmosférica.

Los resultados indican que la mayor concentración de actividades de investigación se localiza en países de Asia, Europa y América del Norte. En contraste, se observa una participación limitada de los países de África y América del Sur, en este contexto, México presenta una contribución reducida con solo 5 publicaciones relacionadas con AWH. Algunos países se ubican en regiones áridas y semiáridas, lo que podría ser una de las razones que impulsan la investigación sobre el tema. Si bien China, Estados Unidos e India dominan la investigación, países como Arabia Saudita, Reino Unido, Irán, Singapur y Japón también contribuyen de manera significativa.

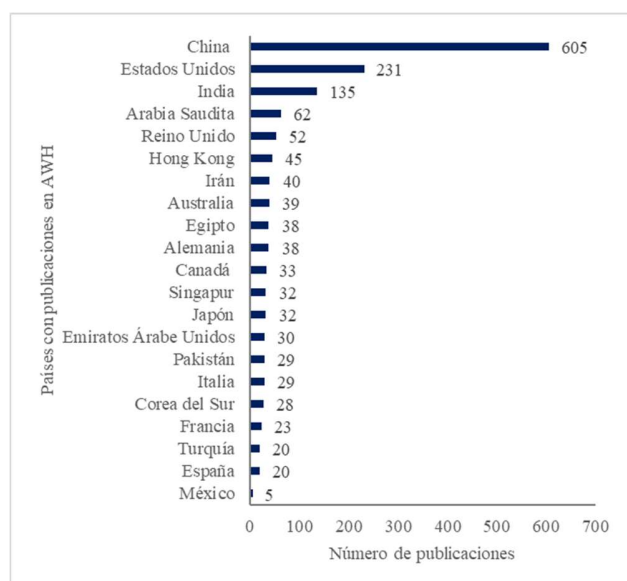


Fig. 2. Publicaciones de artículos de AWH por país.

El crecimiento de la literatura requiere métodos para revisar y analizar las tendencias en el campo de la investigación. La bibliometría es una técnica que apoya en el análisis de la literatura ya que puede aclarar el progreso de un tema en un área del conocimiento específica, evaluar publicaciones y sus interrelaciones, visualizar su contenido con la integración de la matemática, la estadística y la informática [12, 13].

Con base en las metodologías existentes, se realiza un análisis bibliométrico de los métodos de recolección de agua atmosférica (Fig. 3). La red de co-ocurrencia identifica nodos centrales de gran tamaño, lo que indica que las palabras clave con mayor frecuencia en la literatura son agua atmosférica, recolección de agua atmosférica, conservación del agua, vapor de agua y adsorción. Los nodos de la zona central actúan como puente entre distintas líneas de investigación en materiales, procesos físicos y aplicaciones en recursos hídricos, presentando una alta fuerza total de enlace con varios términos de la red. La densidad de las líneas de conexión en esta área sugiere que el campo está altamente conectado. Por otra parte, en la red se muestran cinco grupos principales que conforman una línea temática dentro de la AWH.

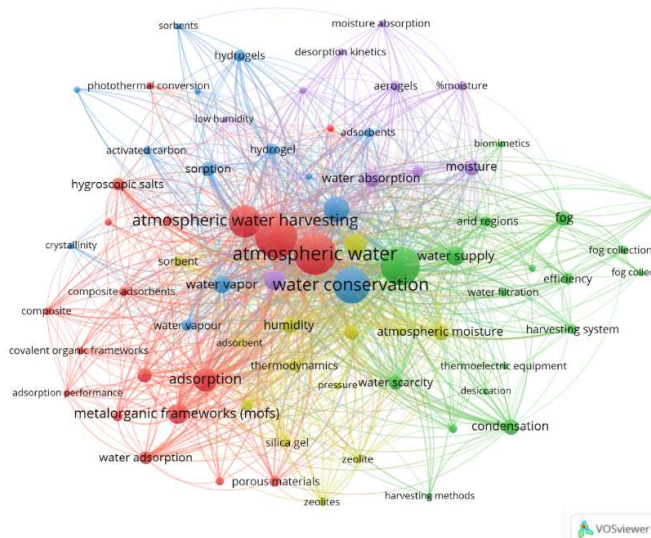


Fig. 3 Análisis bibliométrico de métodos de captación de agua atmosférica. Mapa de co-ocurrencia de palabras clave en AWH y visualización de la red por clústeres.

Grupo 1: El grupo de color rojo se centra en el desarrollo de materiales adsorbentes de agua atmosférica, siendo este un tema actual que se enfoca en la obtención de materiales altamente porosos capaces de capturar el vapor de agua incluso en condiciones de baja humedad relativa [14, 15]. Los materiales con estructuras metal-orgánicas (MOF) y materiales compuestos aparecen como tecnología emergente por su alta capacidad de adsorción y eficiencia energética [3].

Grupo 2: El grupo verde está orientado a las aplicaciones prácticas y sistemas de recolección de agua. En este, las investigaciones se relacionan con sistemas de captación de niebla, tecnologías de condensación y aplicaciones para el abastecimiento de agua en zonas áridas. La fuerte conexión que existe entre los términos anteriores muestra que las tecnologías están siendo investigadas como alternativas viables para enfrentar la escasez hídrica [16].

Grupo 3: El grupo azul está asociado a nuevos materiales poliméricos y sorbentes. En este conjunto, el interés se centra en hidrogeles y materiales híbridos, prometedores para dispositivos pasivos de captación de agua atmosférica [17, 18].

Grupo 4: Este grupo amarillo se enfoca en estudiar las condiciones ambientales que influyen en la eficiencia de los sistemas de captación de agua, como la humedad relativa, la presión, la disponibilidad de vapor de agua en la atmósfera y otros parámetros termodinámicos [19, 20].

Grupo 5: Este grupo se caracteriza por un color morado y se enfoca en los procesos fisicoquímicos de adsorción y liberación de agua. Este analiza la cinética de adsorción y desorción en los ciclos de captura y liberación de agua [21].

En el análisis bibliométrico de la red de co-ocurrencia se revela que las investigaciones se centran en la captación de niebla, condensación atmosférica y sistemas basados en adsorción de vapor de agua, resultados que también coinciden con investigaciones recientes. Actualmente, hay varias publicaciones que abordan la definición del conjunto de técnicas de AWH, pero existen diferencias entre ellas.

Las tecnologías de captación de agua atmosférica se han estado experimentando desde el siglo pasado y sus bases se inspiran en la naturaleza. Por ejemplo, el dorso de los escarabajos del desierto de Namibia presenta una alternancia de protuberancias hidrófilas y superficies hidrófobas que les facilita la recolección de agua en los desiertos secos y les permite sobrevivir [22].

IV. TÉCNICAS DE CAPTACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA

En la actualidad, existen técnicas que facilitan la recolección de agua atmosférica (ver Fig. 4) y se clasifican en métodos de refrigeración pasiva y activa, que dependen de las condiciones geográficas de la región. Otro de los métodos es el basado en la sorción, el cual ha llamado la atención por su eficiencia y su buena capacidad de adsorción [2], y puede operar en regiones áridas con un valor de humedad relativa por debajo del 20 % [23]. La selección de la mejor tecnología para un sitio específico depende de las propiedades psicrométricas del aire, la humedad relativa y la temperatura del punto de rocío [24].

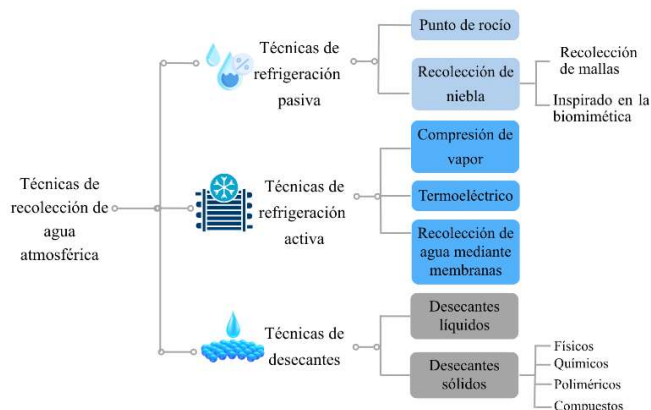


Fig. 4 Técnicas de recolección de agua atmosférica.

A Técnicas de Refrigeración Pasiva

Las tecnologías de recolección pasiva de agua atmosférica se basan principalmente en la captación de niebla y la captación de rocío [2]. Estas no requieren de una fuente de energía externa adicional a las naturales para su funcionamiento [25], mientras que las activas dependen de un abastecimiento de energía [26].

A.1 Recolección de punto de rocío

El punto de rocío es la temperatura a la que el aire se enfría hasta la saturación sin cambiar su contenido de vapor de agua ni su presión [27]. Las gotas de agua que se forman por condensación del vapor sobre una superficie a una temperatura inferior a su punto de rocío se denominan agua de rocío. Los procesos para su cosecha se dividen en algunas categorías: condensador de enfriamiento pasivo (radiación) y desecante regenerado por energía solar [28]. La formación de rocío depende de varios factores, como la humedad y la temperatura ambiente [22].

A.2 Recolección de niebla

La niebla es un fenómeno natural, definido como una nube formada por una gran cantidad de microgotas cerca del suelo

[22]. La técnica tradicional consiste en una malla, expuesta a la atmósfera, sujeta a dos postes, sobre la cual la niebla se impulsa por el viento. Estas microgotas de agua atrapadas en la malla se acumulan y, por gravedad, se drenan hacia los canales de recolección del sistema [28].

El método de recolección de niebla inspirado en la biomimética se centra en imitar las estructuras a micro y nanoescala de organismos naturales, como escarabajos del desierto, cactus o la seda de una araña, para capturar, condensar y transportar gotas mediante gradientes de humedad, lo que facilita una recolección eficiente y pasiva del agua [29, 30]. Estos métodos se basan en el principio de hidrofiliicidad e hidrofobicidad de los materiales donde las zonas hidrofílicas favorecen la nucleación y retención del agua mientras las hidrofóbicas facilitan el movimiento y drenaje de las gotas recolectadas [31, 32, 33].

B Técnicas de Refrigeración Activa

La refrigeración activa radica en enfriar el aire atmosférico por debajo de su punto de rocío para generar gotas de agua [2]. A continuación, se describen los diversos métodos que operan según este principio.

B.1 Compresión de vapor

La refrigeración por compresión de vapor (VCR) para la AWH se basa en el funcionamiento de los frigoríficos y dispositivos de aire acondicionado [34]. Los componentes principales son: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador. El compresor comprime el refrigerante a baja presión y temperatura hasta alcanzar un estado caliente y de alta presión, y luego lo envía al condensador. En el condensador, el refrigerante caliente a alta presión libera el calor y se condensa en estado líquido. Seguidamente, el refrigerante se descomprime a través de la válvula de expansión y entra en el evaporador [26].

B.2 Refrigeración termoeléctrica

Es una técnica que se fundamenta en el efecto Peltier [35]. En este proceso la corriente eléctrica circula por medio de un termopar compuesto de dos materiales semiconductores, absorbiendo calor por un lado y liberándolo por el otro [2]. El espacio donde es absorbido el calor se convierte en el área de enfriamiento y es aquí donde se condensa el vapor de agua de la atmósfera al estado líquido [36].

B.3 Recolección de agua mediante membranas

La recolección de agua atmosférica mediante membranas es una técnica avanzada que separa las funciones de captura y almacenamiento para lograr una extracción eficiente y continua [2]. El proceso utiliza una membrana delgada de hidrogel como medio de transporte para el vapor de agua, mientras que un desecante líquido actúa como bajada que proporciona la fuerza impulsora y el almacenamiento [37]. Inspirada en la piel de la rana arbórea, esta estrategia permite que la captura y el almacenamiento ocurran de manera simultánea, superando las limitaciones cinéticas de los sorbentes sólidos [2, 37]. Estudios recientes han reportado que membranas compuestas con nanohojas de MOF alcanzaron el 91.4 % de saturación en 15

minutos y una capacidad de 8.07 g/g a alta humedad. Estos sistemas pueden liberar el agua mediante energía solar manteniendo un rendimiento estable en múltiples ciclos [38].

C Técnicas de Desecantes o Sorción

La tecnología de AWH basada en la sorción es uno de los métodos con mayor desarrollo en la actualidad, por lo que las investigaciones recientes se enfocan en la obtención de adsorbentes más eficientes para la captación de agua [24]. Estos se destacan por su capacidad para producir agua en condiciones de baja humedad relativa, llegando a funcionar tanto en desiertos como en climas tropicales [39]. Para lograr la recolección de agua por este método, las etapas principales son: la adsorción de vapor por los adsorbentes, el uso de calor para liberar el vapor del adsorbente y la condensación y licuefacción del vapor de agua. [35].

El mecanismo de funcionamiento de las tecnologías que emplean la adsorción consiste en exponer el adsorbente al aire para adsorber la humedad; una vez que el material se satura, el sistema se cierra y se incrementa la temperatura del adsorbente. Este paso provoca la liberación de vapor de agua, lo que eleva la presión al interior del sistema y el vapor de agua se condensa, conformando gotas que pueden recolectarse [39].

La adsorción se considera un proceso fisicoquímico por el cual una sustancia en movimiento, ya sea líquida o gaseosa, se adhiere a la superficie de un material sólido, llamado adsorbente [40]. En cambio, la absorción ocurre cuando las moléculas de una sustancia gaseosa o líquida penetran en materiales líquidos y sólidos, cambiando la estructura y el volumen del material adsorbente [41]; lo cual implica procesos físicos y químicos [42, 43].

Las propiedades de los adsorbentes son clave en la captura de humedad, por lo que contar con desecantes de estructura porosa que ofrezcan mayor área superficial es fundamental [14], una mejor hidrofiliidad [3], bajo consumo energético, estabilidad cíclica [28] y rápida cinética de adsorción y desorción [7] contribuyen a mejorar la absorción de agua.

C.1 Desecantes líquidos

Los desecantes líquidos son materiales con características favorables para la absorción del vapor de agua, y esta puede separarse en fisisorción y absorción química (quimisorción) [44]. La absorción física se debe al efecto osmótico y a las fuerzas de Van der Waals, mientras que la química depende de la estequiometría de la reacción, de la concentración de los reactivos [14]. Algunas de las sales pueden ser NaCl, MgCl₂, LiCl, CaCl₂ [45, 46]. Estas se caracterizan por ser higroscópicas al absorber agua mediante la hidratación. Sin embargo, una situación es su tendencia a disolverse en agua mostrando delicuescencia. [47]. Dado que el manejo de estos materiales y los sistemas que requieren su uso son complejos, estos no son adecuados para la recolección de agua atmosférica [48].

C.2 Desecantes sólidos

Los desecantes sólidos suelen ser económicos, seguros y respetuosos con el medio ambiente y no reaccionan químicamente con la humedad del aire. Estos brindan mejores

resultados que los líquidos; sin embargo, requieren una temperatura más alta para su regeneración. Los silicatos de titanio, el carbón activado, la alúmina [49], el gel de sílice y la zeolita [3, 50] son algunos de los desecantes que más se manejan en la actualidad.

Gel de sílice: con características porosas, naturaleza hidrofílica, estructura fina y granular [51], se emplea como adsorbente para materiales como agua, fenoles, alcoholes y aminas, a través de enlaces de hidrógeno. Este compuesto es muy empleado en las tecnologías de adsorción por su bajo costo, disponibilidad y favorable cinética de adsorción [52]; sin embargo, su capacidad de adsorción a una baja humedad relativa lo limita en el uso para la AWH [53].

Zeolita: presenta una estructura de jaula y es un tipo de cristal de silicato de alúmina combinado con metales alcalinos o alcalinotérreos, presenta un alto volumen de poros y su estructura cargada le facilita su capacidad de sorción de agua a una humedad relativa del 100 %, llegando a captar 0.46 g/g de agua, pero se necesita una temperatura mayor a los 200 °C y alto consumo energético para expulsar el vapor de agua de sus microporos altamente hidrófilos [25]. Actualmente se han desarrollado otros materiales nuevos que favorecen la AWH como lo son los de estructuras metalorgánicas (MOF) [54] y las estructuras covalentes orgánicas (COF) [50].

MOF: es un material cristalino [55] poroso, compuesto por iones metálicos y ligandos orgánicos polifuncionales, que por medio de sus enlaces forman redes tridimensionales interconectadas [14, 56]. La alta porosidad en su estructura provee de una gran capacidad para recolectar y almacenar vapor de agua de la atmósfera [57]. La sorción puede tener lugar siguiendo tres procesos diferentes: quimisorción, fisisorción y condensación capilar [15]. En el proceso de desorción se requiere de un aumento variable de la temperatura de regeneración [58]. La capacidad de sorción del MOF puede influir en factores como el tipo de MOF, la humedad relativa, la temperatura y la presencia de otras moléculas [59]; de ahí que el diseño y la síntesis del material puedan adaptarse para incrementar la capacidad de sorción [55]. En la Tabla. 1 se muestran las propiedades estructurales y termodinámicas de tres MOF representativos, como el MOF-801, el MOF-303 y el MIL-101, incluyendo la temperatura de regeneración, entalpía de desorción, tamaño de poro, área superficial y capacidad de adsorción de agua para establecer una base comparativa en la selección del adsorbente más adecuado según las condiciones climáticas de operación.

Hashjin et al. [60] reportan que el MOF-801 basado en zirconio, constituido por grupos inorgánicos Zr₆O₄(OH)₄ enlazados con ácido fumárico (fumarato C₄H₂O₄²⁻) formando una red tridimensional estable y microporosa [61]. Su estructura presenta un tamaño de poro de 4.8 Å y un área superficial BET de 582 m²/g, lo que, junto con la presencia de grupos hidrofílicos, le confiere una elevada afinidad por el agua. La temperatura de regeneración es de 85 °C, con una entalpía de desorción de 3 050 kJ/kg, lo que indica una interacción fuerte entre el agua y la superficie del material. Su capacidad de adsorción es de 0.18 g/g y puede mantener una sorción significativa a bajas humedades relativas, posicionándolo como

TABLA 1.
MOF REPORTADOS PARA RECOLECCIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA.

Propiedades	Material		
	MOF-801 Zr ₆ O ₄ (OH) ₄	MOF-303 Al(OH)	MIL-101(Cr) Cr ₃ O(H ₂ O) ₂ (OH)
T _{reg} (°C)	85	85	53
ΔH_{des} (kJ/kg ⁻¹)	3 050	2 820	N/A
Tamaño de poro (Å)	4.8	6.0	29.0, 33.0
Área superficial (m ² /g)	582	1 912	4 100
Capacidad de adsorción (g/g)	0.18	0.25	0.9
Referencia	[23]	[63]	[64]

un adsorbente prometedor en ambientes áridos [23]. Por otra parte, estudios recientes han logrado una capacidad de adsorción 1.2 veces mayor en comparación con el material convencional mediante estrategias de modificación estructural [62].

El MOF-303 está compuesto por centros metálicos de aluminio (Al³⁺) coordinados con el ligando 1H-pirazol-3,5-dicarboxilato (PDC), donde el aluminio forma canales hidrofílicos estrechos favorables para la adsorción rápida de agua a baja humedad relativa [65]. Su estructura presenta un tamaño de poro de 6.0 Å y un área superficial de 1 912 m²/g, significativamente mayor que la del MOF-801. La temperatura de regeneración es de 85 °C y la entalpía de desorción es de 2820 kJ/kg. Con una capacidad de adsorción de 0.25 g/g, el MOF-303 destaca por su capacidad de operar eficientemente a valores de humedad relativa inferiores al 30 %, lo que lo hace relevante en zonas desérticas [63]. En otro estudio, este material adsorbe hasta 0.4 g/g de agua a una HR del 20 %, completando el ciclo de adsorción-desorción en 15 minutos [66]. Es un adsorbente de estructura cristalina [67] y su morfología puede ser en forma de bastoncillos, cristales cúbicos o granos, además de la porosidad en su estructura [68].

Estudios recientes demuestran que la modificación de este material con sales higroscópicas, como el adsorbente compuesto MOF-303@LiCl, muestra una adsorción de agua de 0.31 g/g en condiciones de 25 °C y 30 % de HR y una cinética de adsorción alta en 80 minutos [69], pudiendo mejorar su capacidad de adsorción. Sin embargo, la lenta cinética de desorción limita su eficiencia en aplicaciones prácticas [70].

En cuanto al MIL-101(Cr), es un MOF basado en cromo (Cr³⁺) y ácido tereftálico (1,4-benzenodicarboxílico, BDC) [71], cuya estructura presenta dos tipos de poros con tamaños de 29.0 y 33.0 Å, lo que lo clasifica como un material mesoporoso. Posee un área superficial excepcionalmente alta de 4 100 m²/g, la más elevada de los tres materiales analizados. Su temperatura de regeneración es de 53 °C, inferior a la de los

MOF basados en zirconio y aluminio, lo que implica un menor requerimiento energético para su reutilización. La capacidad de adsorción alcanza los 0.9 g/g, la más alta de los tres MOF, en condiciones de mayor humedad relativa [64]. Este material presenta un comportamiento tipo isoterma S, con incrementos entre el 30 % y el 40 % de HR, lo que lo convierte en un adsorbente adecuado en regiones con mayor concentración de vapor de agua [72]. Además, Su et al. [73] combinaron un material de la Universidad de Oslo-66 (UiO-66) y MIL-101 (Cr) para ampliar el rango de operación en diferentes condiciones atmosféricas. La capa externa de UiO-66 favoreció la adsorción a baja humedad relativa, mientras que el MIL-101 (Cr) incrementó la capacidad total de almacenamiento.

V. TECNOLOGÍAS HÍBRIDAS

Muchos investigadores se han enfocado en el estudio de materiales y tecnologías para la captación de agua atmosférica, pero ha sido un reto integrar ambos elementos para desarrollar sistemas de AWH. La evolución de prototipos híbridos que combinan materiales adsorbentes avanzados (MOF y zeolitas) con una fuente de energía térmica o solar se muestra en la Fig. 5.

En 2017, se desarrolló un dispositivo basado en MOF-801 con una fuente de alimentación solar y se probó a 20 °C con una HR del 20 %. Este sistema calentaba directamente la capa de adsorción en la parte superior, después, se condensaba el agua recolectada a través del condensador inferior, logrando recolectar 2.8 L/kg_{MOF-día} [23]. Este sistema demostró un modelo de sorción en las noches y desorción durante el día e incentivó futuras investigaciones sobre la captación con ayuda de la energía solar y capas de sorbente como calentadores fototérmicos y condensadores inferiores [7].

En 2018, Kim et al. [74] plantearon un dispositivo de recolección refrigerado por aire con adsorbente MOF-801, que opera a 20 °C y HR de 30 % en la región de Tempe, Arizona, Estados Unidos; capta 0.25 L/kg_{MOF-día}. Este sistema puede mejorar su rendimiento mediante pilas de adsorbentes multicapas con una arquitectura compacta.

El adsorbente MOF-303 base Al empleado en un dispositivo que ha sido probado en ambientes áridos demuestra su productividad al interior y, en condiciones desérticas de 27 °C y una HR del 10 y 32 %, es capaz de recolectar 0.7 – 1.3 L/kg_{MOF-día}, presentando propiedades favorables en agua de sorción, superando así a otros sorbentes comerciales. Como resultado, el estudio de Hanikel et al. plantea que desarrollar sorbentes con una dinámica de sorción en agua rápida es superior a centrarse en altas capacidades de agua para lograr una recolección a gran escala [63]. Otro estudio se enfoca en un dispositivo móvil autónomo para la extracción del agua de aire que funciona con un caudal de aire de 120 m³/h y llega a producir 0.23 kg/h y 1.45 kg/h de agua en condiciones desérticas [75].

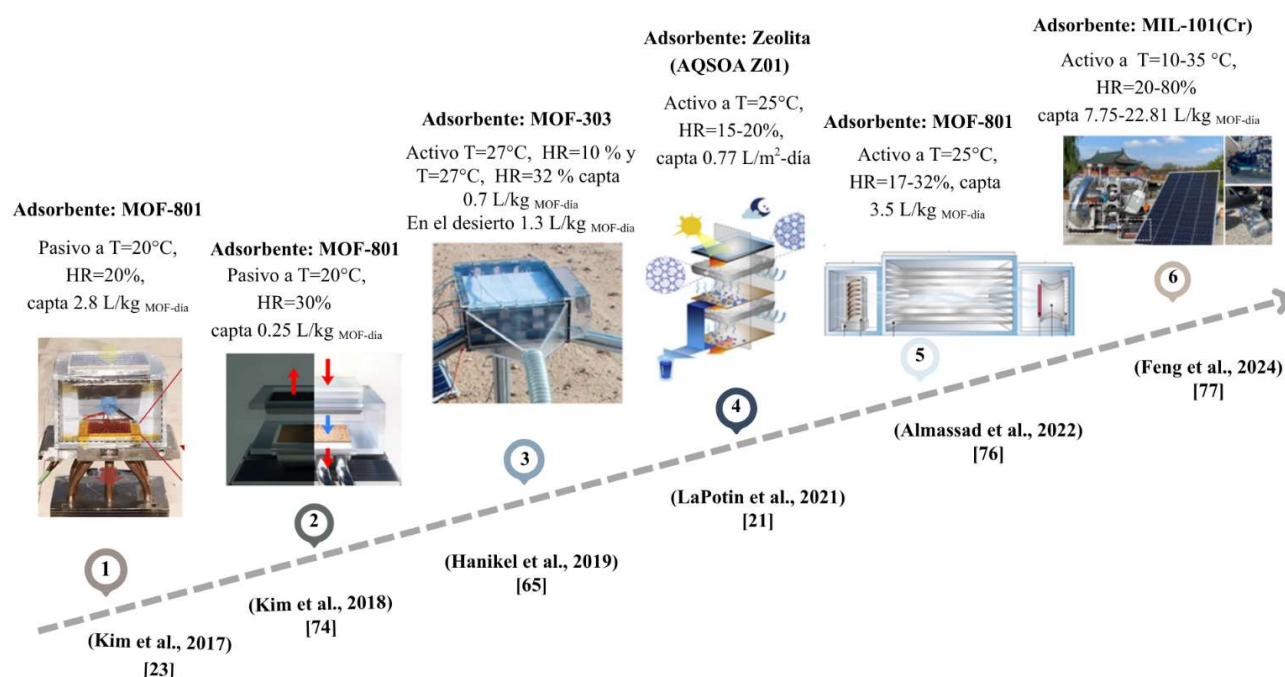


Fig. 5 Tecnologías híbridas de AWH con valores de Temperatura (T), Humedad Relativa (HR) y capacidad de captación de agua en L/kg_{MOF}-día

En su estudio, LaPotin et al. [21] desarrollan y prueban una tecnología de dos etapas con un sistema de transporte optimizado, en la que se recupera el calor latente de condensación en la etapa superior y se mantiene la diferencia de temperatura entre ambas etapas para incrementar la productividad diaria de agua. La investigación arroja 0,77 L/m²/día de agua capturada mediante zeolita comercial y en experimentos al aire libre. Este modelo demuestra que, al incrementar la temperatura en la fase superior con modificaciones en el diseño, se puede duplicar la producción de agua en una sola fase, lo que lo convierte en un dispositivo prometedor para la recolección de agua atmosférica mediante energía solar.

En 2022, se desarrolla otro dispositivo híbrido utilizando un adsorbente MOF-801, mismo que es probado en un ambiente a 25 °C, 17-32 % de HR, resultando en 3.5 L/kg_{MOF}-día, demostrando que el MOF puede ser sensible al ambiente y adaptable [76]. El adsorbente MIL-101 (Cr) también se ha evaluado en dispositivos para la captación de agua atmosférica. El diseño presentado se basa en el comportamiento de sorción-desorción y es ajustable mediante adsorción asistida por enfriamiento. Esta tecnología puede operar en una variedad de climas (10-35 °C, 20-80 % de HR). Con las pruebas realizadas en campo, se obtuvieron aproximadamente 990 mL de agua limpia de manera continua en un día, a 26 % de HR [77].

VI. AVANCES EN MÉXICO

En México, la investigación y desarrollo de tecnologías de recolección de agua atmosférica han mostrado un crecimiento ascendente en años recientes, mismo que se debe en gran medida a la problemática de escasez hídrica en diversas

regiones del país [78, 79]. Estudios realizados por instituciones como la Universidad Autónoma de San Luis de Potosí han demostrado la viabilidad del uso de generadores de agua atmosférica en zonas semiáridas, alcanzando producciones de hasta 18 L/día en condiciones favorables [80]. Por otra parte, en el estudio de González Grovas et al. [81] se presenta un prototipo en fase experimental que recolectó 21 mL de agua por hora de funcionamiento.

Adicionalmente, se han demostrado avances en la captación de agua de niebla mediante técnicas pasivas, lo que las convierte en una alternativa sostenible en zonas áridas y rurales, debido a su bajo consumo energético y a su nulo consumo de energía. Se reporta el uso de mallas colectoras optimizadas que mejoran la captura, aunque su rendimiento está en dependencia de las condiciones climáticas locales, persistiendo desafíos relacionados con la viabilidad ambiental y el mantenimiento de los sistemas [82].

En el ámbito comercial, dispositivos de AWH basados en la condensación han comenzado a implementarse en sectores urbanos e industriales, como es el caso de AirWater México, una compañía que vende equipos capaces de recolectar entre 16 y 30 L/día a una humedad mínima de 30-35 %. Este funciona con condensación del aire más un sistema de filtración [83]. Los dispositivos comerciales Osoley ofrecen una solución innovadora y sostenible para el abastecimiento de agua potable; de igual manera, basados en la condensación, cuentan con diferentes modelos a pequeña y gran escala [84].

La compañía mexicana Vital Water ha desarrollado una tecnología que transforma la humedad en agua. Este dispositivo consiste en un sistema de condensación que requiere una fuente

de alimentación eléctrica convencional. El dispositivo opera entre 15 °C y 40 °C y con una humedad entre 35 % y 95 %. Por otra parte, cuenta con 13 etapas de filtración y esterilización. El aire húmedo entra al dispositivo Vital Water para eliminar polvo y suciedad; luego, se somete al proceso de producción de agua y, de ahí, se escurre en una bandeja colectora. Seguidamente, el líquido se somete a tratamiento mediante filtros y lámparas ultravioletas, y finalmente se almacena en un tanque. La capacidad de producción del dispositivo es de 30 a 60 L de agua por día a 30 °C y una HR del 80 %. [85].

Si bien las tecnologías existentes en México se basan en la condensación, dispositivos avanzados desarrollados en Israel, Europa y Asia, como Watergen, Aeronero, Rain of Life y Hendrx, aún presentan una penetración limitada en el mercado mexicano, lo que evidencia una brecha tecnológica. Paralelamente, las investigaciones recientes han evolucionado hacia el desarrollo de materiales adsorbentes y sistemas híbridos [14, 21].

VII. DISCUSIÓN

La recolección de agua atmosférica se ha consolidado como una alternativa prometedora frente a la crisis hídrica mundial, evidenciada por el aumento de investigaciones desde el año 2020 en adelante [8, 11]. Sin embargo, el desarrollo científico se concentra principalmente en países como China, Estados Unidos e India, mientras regiones como México presentan una participación limitada, aunque cuentan con condiciones favorables para su implementación [13].

La viabilidad tecnológica depende críticamente de la humedad relativa (HR). Los sistemas de condensación son comercialmente dominantes pero ineficientes a humedades relativas inferiores al 40 % por su alto consumo energético [2, 26]. En contraste, los MOF microporosos (MOF-801: 0.18 g/g; MOF-303: 0.25 g/g) adsorben eficientemente a HR < 30 % [23, 63], mientras que el MIL-101(Cr) (0.9 g/g) es más adecuado para HR mayor al 40 % [64], según la Tabla 1.

La Fig. 5 evidencia que los prototipos híbridos amplían el rango de operación (10-35 °C, 20-80 % HR), indicando que no existe una tecnología única, sino una selección adaptada al clima [86].

El escalamiento enfrenta tres limitaciones principales: (i) cinética de desorción lenta (especialmente en MOF-303) que reduce la productividad diaria [67]; (ii) costos elevados de síntesis (MOF-801) requiere zirconio) y estabilidad a largo plazo [60]; falta estandarización en métricas (g/g y L/kg_{MOF-día}), que dificulta la comparación entre estudios [2]. Estas barreras exigen mejorar la eficiencia de desorción, disminuir el uso de materiales y unificar los protocolos.

México justifica sistemas híbridos por su diversidad climática: zonas áridas (norte, 60 % del territorio) con HR entre 20-40 % y alta irradiación solar (5.5-6.5 kWh/m²/día) hacen viables los sistemas de condensación [87], pero son favorables para MOF-801 y MOF-303, mientras que en regiones tropicales (sur-suroeste) podrían aprovechar el MIL-101(Cr) y esta figura muestra que prototipos híbridos cuyo funcionamiento sea con energía solar son los más aceptables a estas condiciones, así como descentralizados [23].

Los vacíos científicos concretos incluyen la carencia de validación en condiciones climáticas reales (ciclos día-noche, estacionales), la necesidad de acelerar la desorción sin aumentar el consumo energético, la ausencia de estudios de estabilidad a largo plazo (mayores a 1000 ciclos) y de efectos de contaminantes atmosféricos, la escasez de análisis de costo-efectividad y de ciclo de vida que comparen MOF con tecnologías convencionales, así como el escalamiento de prototipos de laboratorio a sistemas operativos de gran escala.

VIII. CONCLUSIONES

El análisis bibliométrico revela que China, Estados Unidos e India concentran la mayor producción científica en la recolección de agua atmosférica, mientras que México presenta una participación limitada. Las redes de co-ocurrencia identifican tres principales líneas de investigación predominantes en materiales adsorbentes, sistemas de condensación y tecnologías híbridas.

Las características de los MOF analizados demuestran que la viabilidad de cada adsorbente depende críticamente de la humedad relativa. El MOF-801 y MOF-303 con estructuras porosas son adecuados para humedad relativa inferior al 30 %, mientras que el MIL-100(Cr), con estructura mesoporosa y mayor capacidad de adsorción, resulta viable para humedad relativa mayor al 40 %. No existe un adsorbente universal, la selección debe basarse en las condiciones climáticas de la región.

Los sistemas de condensación, aunque comercialmente dominantes, resultan ineficientes a bajas humedades relativas por su alto consumo energético. En cambio, las tecnologías basadas en sorción revelan un alto potencial, aunque enfrentan retos para el escalamiento, como cinéticas de desorción lentas, altos costos de síntesis y falta de estandarización de las métricas de rendimiento.

En México, los avances se concentran fundamentalmente en tecnologías de condensación, lo que evidencia la necesidad de fortalecer la investigación en materiales avanzados y en sistemas híbridos adaptados a las condiciones locales, en línea con la política hídrica nacional de soluciones descentralizadas.

Se recomienda que futuras investigaciones se orienten a la validación en condiciones climáticas reales, a la aceleración de la cinética de desorción, a la estabilidad a largo plazo, al diseño de materiales adsorbentes de bajo costo y al desarrollo de sistemas híbridos adaptados a las condiciones locales.

REFERENCIAS

- [1] H. Gebreslassie, G. Berhane, T. Gebreyohannes, M. Hagos, A. Hussien and W. Walraevens, "Water Harvesting and Groundwater Recharge: A Comprehensive Review and Synthesis of Current Practices," *Water*, vol. 17, no. 976, 2025.
- [2] M. Ehtisham, M. Saeed-UI-Hassan and A. Poater, "A comprehensive review of approaches, systems, and materials used in adsorption-based atmospheric water harvesting," *Sci Total Environ.*, vol. 958, no. 177885, 2025.
- [3] Z. Ahrestani, H. B. Motejadded Emrooz and S. Sadeghzadeh, "An overview of atmospheric water harvesting methods, the inevitable path of the future in water supply," *RSC Advances*, vol. 13, pp. 10273-10307,

2023.

- [4] Organización de Naciones Unidas, Naciones Unidas, 02 Marzo 2026. [En línea]. Available: <https://news.un.org/es/story/2026/01/1541043>.
- [5] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), "Estadísticas del agua en México 2023.," *Diario Oficial de la Federación*, 2023.
- [6] B. Tashtoush and A. Alshoubaki, "Atmospheric water harvesting: A review of techniques, performance, renewable energy solutions, and feasibility," *Energy*, vol. 280, no. 128186, 2023.
- [7] S. Bai, X. Yao, M. Y. Wong, Q. Xu, H. Li, K. Lin, Y. Zhou, T. C. Ho, A. Pan, J. Chen, Y. Zhu, S. Wang and C. Y. Tso, "Enhancement of Water Productivity and Energy Efficiency in Sorption-based Atmospheric Water Harvesting Systems: From Material, Component to System Level.," *ACS Nano*, vol. 18, no. 46, pp. 31597-31631, 2024.
- [8] T. Xiang, S. Xie, G. Chen, C. Zhanga and Z. Guo, "Recent advances in atmospheric water harvesting technology and its development," *Mater. Horiz.*, vol. 12, no. 1084, 2025.
- [9] A. Bishwas and R. P. Gautam, "Metal-organic frameworks for atmospheric water harvesting: A review of structural and environmental influences," *Himalayan Phys.*, vol. 13, pp. 1-14, 2025.
- [10] A. Kandeal, A. Joseph, M. Elsharkawya, M. Elkadeem, M. A. Hamada, A. Khalil, M. Eid Moustapha and S. W. Sharshir, "Research progress on recent technologies of water harvesting from atmospheric air: A detailed review," *Sustainable Energy Technologies and Assessments Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 52, no. 102000, 2022.
- [11] E. B. Agyekum, F. Odoi-Yorke, W. F. Mbasso, R. O. Darko, O. R. Adegboye and A. A. Abbey, "Towards a comprehensive understanding of atmospheric water harvesting technologies – a systematic and bibliometric review," *Energy Rep.*, vol. 12, pp. 3795-3811, 2024.
- [12] S. Nakagawa, G. Samarasinghe, N. R. Haddaway, M. J. Westgate, R. E. O'Dea, D. W.A. Noble and M. Lagisz, "Research Weaving: Visualizing the Future of Research Synthesis," *Trends Ecol. Evol.*, vol. 34, no. 3, 2019.
- [13] Y. Zhong-Zhu, F. Yu-Zhou, C. Shao-Jun, F.-J. W. Feng-Jie, G. Jing, W. Chen-Xi, S. Bo-Shuang, T. Si-Lu, G. Si-Lian, K. Juan-Juan, L. Yan and L. Sheng-Hong, "A bibliometric analysis of hydrogel research in various fields: the trends and evolution of hydrogel application," *J. Nanobiotechnol.*, vol. 23, no. 70, 2025.
- [14] X. Zhou, H. Lu, F. Zhao and G. Yu, "Atmospheric Water Harvesting: A Review of Material and Structural Designs," *ACS Mater. Lett.*, vol. 2, pp. 671-684, 2020.
- [15] W. Xu and O. M. Yaghi, "Metal–Organic Frameworks for Water Harvesting from Air, Anywhere, Anytime," *ACS Cent. Sci.*, vol. 6, pp. 1348-1354, 2020.
- [16] B. Ghiasi, Z. H. Aslani and T. Alisoltani, "Assessing the feasibility and sustainability of fog water harvesting as an alternative water resource," *Nature*, vol. 15, no. 19254, 2025.
- [17] J. He, H. Yu, L. Wang, J. Yang, Y. Zhang, W. Huang and C. Ouyang, "Hygroscopic photothermal sorbents for atmospheric water harvesting: From preparation to applications," *Eur. Polym. J.*, vol. 202, no. 112582, 2024.
- [18] Y. Guo, W. Guan, C. Lei, H. Lu, W. Shi and G. Yu, "Scalable super hygroscopic polymer films for sustainable moisture harvesting in arid environments.," *Nat. Commun.*, vol. 13, no. 2761, 2022.
- [19] Y. Tu, R. Wang, Y. Zhang and J. Wang, "Progress and Expectation of Atmospheric Water Harvesting," *Joule*, vol. 2, pp. 1452-1475, 2018.
- [20] W. Lu, X. Li, Y. Wang, F. Yao, X. Wang, H. Dai and H. Geng, "All-regional highly efficient moisture capturing and sunlight driven steam generation," *Water Res.*, vol. 279, no. 123398, 2025.
- [21] A. LaPotin, Y. Zhong, L. Zhang, L. Zhao, A. Leroy, H. Kim, S. R. Rao and E. N. Wang, "Dual-Stage Atmospheric Water Harvesting Device for Scalable Solar-Driven Water Production," *Joule*, vol. 5, pp. 166-182, 2021.
- [22] K. Chen, Y. Tao and W. Shi, "Recent Advances in Water Harvesting: A Review of Materials, Devices and Applications.," *Sustainability*, vol. 14, no. 6244, 2022.
- [23] H. Kim, S. Yang, S. R. Rao, S. Narayanan, E. A. Kapustin, H. Furukawa, A. S. Umans, O. M. Yaghi and E. N. Wang, "Water harvesting from air with metal-organic frameworks powered by natural sunlight," *Science*, vol. 356, pp. 430-434, 2017.
- [24] A. A. Salehi, M. Ghannadi-Maragheh, M. Torab-Mostaedi, R. Torkaman and M. Asadollahzadeh, "A review on the water-energy nexus for drinking water production from humid air," *Sustain. Energy Rev.*, vol. 120, no. 109627, 2020.
- [25] W. Zeng, T. You and W. Wu, "Passive atmospheric water harvesting: Materials, devices, and perspectives," *Nano Energy*, vol. 125, no. 109572, 2024.
- [26] G. Raveesh, R. Goyal and S. Tyagi, "Advances in atmospheric water generation technologies," *Energy Convers. Manag.*, vol. 239, no. 114226, 2021.
- [27] J. Nie and X. Liu, "A review of dew point sensors: Recent advances and future development," *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 417, no. 136115, 2024.
- [28] H. Jarimi, R. Powell and S. Riff, "Review of sustainable methods for atmospheric water harvesting," *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 15, pp. 253-276, 2020.
- [29] J.-L. Yang, Y.-Y. Song, X. Zhang, Z.-Q. Zhang, G.-G. Cheng, Y. Liu, G.-J. Lv and J.-N. Ding, "Research progress of bionic fog collection surfaces based on special structures from natural organisms," *RSC Adv.*, vol. 13, no. 27839, 2023.
- [30] X. Yang, S. Li, X. Wang, X. Qian and S. Zhang, "Bio-inspired Fog Harvesting Fabric Materials: Principle, Fabrication, Engineering Applications and Challenges," *J. Bionic Eng.*, vol. 22, no. 1014-1038, 2025.
- [31] S. Dong, G. Li, S. Jin, H. Hu and G. Ye, "Recent Advances and Retrospective Review in Bioinspired Structures for Fog Water Collection," *Biomimetics*, vol. 10, no. 791, 2025.
- [32] K. Wan, X. Gou and Z. Guo, "Bio-inspired Fog Harvesting Materials: Basic Research and Bionic Potential Applications," *J. Bionic Eng.*, vol. 18, pp. 501-533, 2021.
- [33] J. P. Chakrapani Gunarasan and J.-W. Lee, "Biomimetic materials for fog harvesting: Prospects and challenges," *Desalination*, vol. 615, no. 119324, 2025.
- [34] T. H. Kwan, S. Yuan, Y. Shen and G. Pei, "Comparative meta-analysis of desalination and atmospheric water harvesting technologies based on the minimum energy of separation," *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 10072-10087, 2022.
- [35] M. Wang, E. Liu, T. Jin, S.-u. Zafar, X. Mei, M.-L. Fauconnier and C. De Clerck, "Towards a better understanding of atmospheric water harvesting (AWH) technology," *Water Res.*, vol. 250, no. 121052, 2024.
- [36] R. Tu and Y. Hwang, "Reviews of atmospheric water harvesting technologies," *Energy*, vol. 201, no. 117630, 2020.
- [37] Y. Gao, A. Eason, S. Ricoy, A. Cobb, R. Phung, A. Kashani, M. R. Mata, A. Sahm, N. Ortiz, S. Rao y H. J. Cho, "High-yield atmospheric water capture via bioinspired material segregation," *PNAS*, vol. 121, n° 44, 2024.
- [38] L. Zhang, R. Li, S. Zheng, H. Zhu, M. Cao, M. Li, Y. Hu, L. Long, H. Feng and C. Y. Tang, "Hydrogel-embedded vertically aligned metal-organic framework nanosheet membrane for efficient water harvesting," *Nature Communications*, vol. 15, no. 9738, 2024.
- [39] M. Saeed-Ul-Hassan, M. Ehtisham, A. K. Badawi, A. M. Khan, R. A. Khan and B. Ismail, "A comparative study of moisture adsorption on GO, MOF-5, and GO/MOF-5 composite for applications in atmospheric water harvesting," *Nanoscale Adv.*, vol. 6, no. 3668, 2024.
- [40] Asociación Mexicana de Adsorción, Adsorción, 2025. [En línea]. Available: <https://www.adsorcion.com.mx/ADSORCION/>.
- [41] H.-J. Butt, K. Graf and M. Kappl, *Physics and Chemistry of Interfaces*, John Wiley & Sons, 2013.
- [42] Y. Cao, Y. Chen, X. Sun, Z. Zhang and T. Mu, "Water sorption in ionic liquids: kinetics, mechanisms and hydrophilicity," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 14, pp. 12252-12262, 2012.
- [43] A. LaPotin, H. Kim, S. R. Rao and E. N. Wang, "Adsorption-Based Atmospheric Water Harvesting: Impact of Material and Component Properties on System-Level Performance," *ACC. Chem. Res.*, vol. 52, no. 6, pp. 1588-1597, 2019.
- [44] N. Yu, R. Wang and L. Wang, "Sorption thermal storage for solar energy,"

- Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 39, pp. 489-514, 2013.
- [45] M. Bilal, M. Sultan, T. Morosuk, W. Den, U. Sajjad, M. M. Aslam, M. W. Shahzad and M. Farooq, "Adsorption-based atmospheric water harvesting: A review of adsorbents and systems," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 133, no. 105961, 2022.
- [46] R. Li, Y. Shi, M. Alsaedi, M. Wu, L. Shi and P. Wang, "Hybrid Hydrogel with High Water Vapor Harvesting Capacity for Deployable Solar-Driven Atmospheric Water Generator," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 52, pp. 11367-11377, 2018.
- [47] H. Lu, W. Shi, Y. Guo, W. Guan, C. Lei and G. Yu, "Materials Engineering for Atmospheric Water Harvesting: Progress and Perspectives," *Adv. Mater.*, vol. 34, no. 2110079, 2022.
- [48] Y. Hu, Z. Fang, X. Ma, X. Wan, S. Wang, S. Fan, Z. Ye and X. Peng, "CaCl₂ Nanocrystals decorated photothermal Fe-ferrocene MOFs hollow microspheres for atmospheric water harvesting," *Appl. Mater. Today*, vol. 23, no. 101076, 2021.
- [49] N. Shafeian, A. Ranjbar and T. B. Gorji, "Progress in atmospheric water generation systems: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 161, no. 122325, 2022.
- [50] E. Ansari, S. Elwaddood, H. Balakrishnan, I. Sapkaite, C. Munro, G. N. Karanikolos, K. Askar, H. Arafat, S. S. Mao and L. F. Dum'ee, "Sorption-based atmospheric water harvesters - perspectives on materials design and innovation," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 12, no. 113960, 2024.
- [51] K. Thu, A. Chakraborty, B. B. Saha and K. C. Ng, "Thermo-physical properties of silica gel for adsorption desalination cycle," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 50, pp. 1596-1602, 2013.
- [52] W. Shi, W. Guan, C. Lei and G. Yu, "Sorbents for Atmospheric Water Harvesting: From Design Principles to Applications," *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 61, no. e202211267, 2022.
- [53] M. Ejeian and R. Wang, "Adsorption-based atmospheric water harvesting," *Joule*, vol. 5, pp. 1678-1703, 2021.
- [54] S. Abd Elwaddood, L. Dumée, Y. Al Wahedi, A. Al Alili and G. Karanikolos, "Aluminophosphate - based adsorbents for atmospheric water generation," *J. Water Process Eng.*, vol. 49, no. 103099, 2022.
- [55] M. J. Kalmutzki, C. S. Diercks and O. M. Yaghi, "Metal-Organic Frameworks for Water Harvesting from Air," *Adv. Mater.*, vol. 30, no. 1704304, 2018.
- [56] N. Hanikel, D. Kurandina, S. Chheda, Z. Zheng, Z. Rong, S. E. Neumann, J. Sauer, J. I. Siepmann, L. Gagliardi and O. M. Yaghi, "MOF Linker Extension Strategy for Enhanced Atmospheric Water Harvesting," *ACS Cent. Sci.*, vol. 9, pp. 551-557, 2023.
- [57] H. Lin, Y. Yang, Y.-C. Hsu, J. Zhang, C. Welton, I. Afolabi, M. Loo and H.-C. Zhou, "Metal-Organic Frameworks for Water Harvesting and Concurrent Carbon Capture: A Review for Hygroscopic Materials," *Adv. Mater.*, vol. 36, no. 2209073, 2024.
- [58] P. D. C. Dietzel, R. E. Johnsen, R. Blom and H. Fjellvåg, "Structural Changes and Coordinatively Unsaturated Metal Atoms on Dehydration of Honeycomb Analogous Microporous Metal-Organic Frameworks," *Chem. Eur. J.*, vol. 14, pp. 2389-2397, 2008.
- [59] Z. Chen, Z. Shao, Y. Tang, F. Deng, S. Du and R. Wang, "Study of the Scale-Up Effect on the Water Sorption Performance of MOF Materials," *ACS Mater. Au*, vol. 3, pp. 43-54, 2023.
- [60] M. A. Hashjin, S. Zarshad, H. B. Motejadded Emrooz and S. Sadeghzadeh, "Enhanced atmospheric water harvesting efficiency through green-synthesized MOF-801: a comparative study with solvothermal synthesis," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 16983, 2023.
- [61] M. Taddei, M. J. McPherson, A. Gougsa, J. Lam, J. Sewell and E. Andreoli, "An Optimised Compaction Process for Zr-Fumarate (MOF-801)," *Inorganics*, vol. 7, no. 110, 2019.
- [62] Y. He, T. Fu, L. Wang, J. Liu, G. Liu and H. Zhao, "Self-assembly of MOF-801 into robust hierarchically porous monoliths for scale-up atmospheric water harvesting," *Chem. Eng. J.*, vol. 472, no. 44786, 2023.
- [63] N. Hanikel, M. S. Prévot, F. Fathieh, E. A. Kapustin, H. Lyu, H. Wang, N. J. Diercks, T. G. Glover and O. M. Yaghi, "Rapid Cycling and Exceptional Yield in a Metal-Organic Framework Water Harvester," *ACS. Cent. Sci.*, vol. 5, no. 1699-1706, 2019.
- [64] J. Xu, T. Li, J. Chao, S. Wu, T. Yan, W. Li, B. Cao and R. Wang, "Efficient Solar-driven Water Harvesting from Arid Air with Metalorganic Frameworks Modified by Hygroscopic Salt," *Angew Chem Int Ed Engl*, vol. 59, no. 13, pp. 5202-5210, 2020.
- [65] N. Shaheed and A. Shaabani, "Defect-rich MOF-303 as a dual acid-base heterogeneous catalyst for the one-pot Biginelli synthesis of dihydropyrimidinones," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 37286, 2025.
- [66] L. Jia, Y. Hu, Z. Liu, H. Hao, H. Xu, W. Huang and X. He, "Porous materials MOFs and COFs: Energy-saving adsorbents for atmospheric water harvesting," *Mater. Today*, vol. 78, pp. 92-111, 2024.
- [67] A. E. Abu EL-Maaty, M. A. Abdalla, M. Essalhi, M. M. Abdelnaby, M. M. Mahmoud, M. A. Habib, M. Antar and R. Ben-Mansour, "Kinetics of Water Adsorption in Metal-Organic Framework (MOF-303) for Adsorption Cooling Application," *Energy Convers. Manag. X*, vol. 24, no. 100694, 2024.
- [68] S. Główniak, B. Szczesniak, J. Choma and M. Jaroniec, "Mechanochemical Synthesis of MOF-303 and Its CO₂ Adsorption at Ambient Conditions," *Molecules*, vol. 29, no. 2698, 2024.
- [69] G. Tian, C. Fu and Z. Guo, "A novel hygroscopic salt-modified MOF-303 with efficient solar-driven water harvesting from arid air," *Nanoscale*, vol. 17, pp. 12340-12349, 2025.
- [70] M. Aziz, R. Hassan, M. Saeed-UI-Hassan, M. Ehtisham, M. S. Almatawa, A. K. Badawi and B. Ismail, "Efficient water capture under low humidity using Ni-modified MOF-5: scalable atmospheric water harvesting systems," *RSC Adv.*, vol. 15, pp. 34003-34015, 2025.
- [71] L. Bromberg, Y. Diao, H. Wu, S. A. Speakman and T. A. Hatton, "Chromium(III) Terephthalate Metal Organic Framework (MIL-101): HF-Free Synthesis, Structure, Polyoxometalate Composites, and Catalytic Properties," *Chem. Mater.*, vol. 24, pp. 1664-1675, 2012.
- [72] A. Mulchandani and P. Westerhoff, "Geospatial Climatic Factors Influence Water Production of Solar Desiccant Driven Atmospheric Water Capture Devices," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 54, pp. 8310-8322, 2020.
- [73] C. Su, Z. Wu, J. Zhang, K. Li, Y. Kong, N. Zhang and Y. Yang, "A high-performance solar-driven atmospheric water harvester for arid regions based on a self-assembled MOF-on-MOF heterostructure," *Appl. Mater. Today*, vol. 38, no. 102247, 2024.
- [74] H. Kim, S. R. Rao, E. A. Kapustin, L. Zhao, S. Yang, O. M. Yaghi and E. N. Wang, "Adsorption-based atmospheric water harvesting device for arid climates," *Nature Communications*, vol. 9, no. 1191, 2018.
- [75] N. Pokorny, V. Shemelin and J. Novotny, "Experimental study and performance analysis of a mobile autonomous atmospheric water generator designed for arid climatic conditions," *Energy*, vol. 250, no. 123813, 2022.
- [76] H. A. Almassad, R. I. Abaza, L. Siwwan, B. Al-Maythaly and K. E. Cordova, "Environmentally adaptive MOF-based device enables continuous self-optimizing atmospheric water harvesting," *Nat. Commun.*, vol. 13, no. 4873, 2022.
- [77] Y. Feng, L. Ge, Y. Zhao, Q. Li, R. Wang and T. Ge, "Active MOF water harvester with extraordinary productivity enabled by cooling-enhanced sorption," *Energy Environ. Sci.*, vol. 17, no. 1083-1094, 2024.
- [78] E. N. Rodríguez González, Artist, "Generador de agua del aire con producción de energía eléctrica termosolar." [Art]. Universidad Nacional Autónoma de México, 2020.
- [79] A. L. Bautista-Olivas, M. Mendoza Cariño, F. Cruz Bautista, C. R. Álvarez Chávez and H. F. Duarte Tagles, "Potencial de captura de agua atmosférica en el noroeste de México," *Interciencia*, vol. 43, no. 10, pp. 711-715, 2018.
- [80] J. A. Mendoza-Escamilla, F. J. Hernandez-Rangel, P. Cruz-Alcántar, M. Z. Saavedra-Leos, J. Morales-Morales, R. A. Figueroa-Díaz, C. M. Valencia-Castillo and F. J. Martinez-Lopez, "A Feasibility Study on the Use of an Atmospheric Water Generator (AWG) for the Harvesting of Fresh Water in a Semi-Arid Region Affected by Mining Pollution," *Appl Sci*, vol. 9, no. 3278, 2019.
- [81] L. R. González Grovas, G. Meza Flores, S. Herrera Velarde and L. A. Barradas Sánchez, "Diseño de un prototipo condensador de humedad atmosférica para obtener agua potable en zonas rurales," *Cienc. Latina Int.*, vol. 7, no. 6, 2023.
- [82] E. Chavero-Navarrete, C. A. Poblano-Salas, A. Escamilla-Martínez, M. A. Cortina-Gutiérrez, J. Corona-Castuera and A. García-Meneses,

"Avances y Desafíos en la Cosecha de Agua Atmosférica: Revisión de Técnicas Pasivas para la Recolección de Niebla," *Investigium*, vol. 10, 2024.

- [83] Air Water Generator, Air Water Generator, 23 Enero 2025. [En línea]. Available: <https://airwater.mx/>.
- [84] Osoley México, Osoley, Febrero 2026. [En línea]. Available: <https://osoley.com.mx>.
- [85] Grupo IG, Julio 2025. [En línea]. Available: <https://vitalwater.com.mx/product/vw-60f/>.
- [86] D. Sun, S. Chen, H. Wu, M. Qiu, Y. Lu, N. Wang, Q. Ma, L. Shi and Q. Yi, "Core-Shell Metal-Organic Framework Composites: A Review of Synthetic Strategies and Applications in Catalysis and Adsorption," *Molecules*, vol. 31, no. 6, 2026.
- [87] S. J. Villajuana-Cervantes, H. J. Carrillo-escalante, D. S. Pérez-Sosa, F. d. J. Maiza-López, O. E. Castro-Yam and L. A. Valdez-Arguelles, "Diseño y construcción de un prototipo de captación de agua con energía solar a través de la condensación de la humedad del aire atmosférico," *Revista del Centro de Graduados e Investigación. Instituto Tecnológico de Mérida.*, vol. 39, no. 107, pp. 164-168.