

Avances y Desafíos en la Cosecha de Agua Atmosférica: Revisión de Técnicas Pasivas para la Recolección de Niebla

Advances and Challenges in Atmospheric Water Harvesting: A Review of Passive Fog Collection Techniques

Ernesto Chavero-Navarrete ^a, Carlos A. Poblano-Salas ^b, Agustín Escamilla-Martínez ^c, Marco A. Cortina-Gutiérrez ^d, Jorge Corona-Castuera ^e, Antonio García-Meneses ^f

Abstract:

Passive atmospheric water harvesting, such as fog collection, has gained attention in recent years as a sustainable solution to address water scarcity in arid and semi-arid regions. This article provides a comprehensive review of passive fog collection techniques using meshes, highlighting recent technological advancements, the use of innovative materials, and the development of methodologies applied to this field. Additionally, current challenges are analysed, including collection efficiency, material durability, and the economic viability of these systems. The objective of this work is to provide an overview of emerging trends and to identify the areas of research required to optimize these technologies. Moreover, it aims to provide a solid foundation for researchers and professionals interested in the development and implementation of passive atmospheric water harvesting systems.

Keywords:

Atmospheric water, Passive water harvesting, Fog, Meshes, Hydrophobic, Hydrophilic

Resumen:

La captación de agua atmosférica a través de medios pasivos, como la recolección de niebla mediante mallas, ha ganado atención en los últimos años como una solución sostenible para enfrentar la escasez de agua en regiones áridas y semiáridas. Este artículo ofrece una revisión exhaustiva de las técnicas pasivas de recolección de niebla por medio de mallas, destacando los avances tecnológicos más recientes, el uso de materiales innovadores y el desarrollo de metodologías aplicadas a este campo. También, se analizan los desafíos actuales, incluyendo la eficiencia de recolección, la durabilidad de los materiales y la viabilidad económica de estos sistemas. El objetivo de este trabajo es proporcionar una visión general de las tendencias emergentes e identificar las áreas de investigación requeridas para optimizar estas tecnologías. Además, proporcionar una base sólida para investigadores y profesionales interesados en el desarrollo y la implementación de sistemas pasivos de cosecha de agua atmosférica.

Palabras Clave:

Agua atmosférica, Captación pasiva de agua, Niebla, Mallas, Hidrófobo, Hidrófilo

Introducción

Según la Organización Mundial de la Salud, alrededor de 2.2 mil millones de personas carecieron de acceso a agua potable en 2020 y se estima que para 2025, la mitad de la

^{a,c,f} CIATEQ, Centro de Tecnología Avanzada | Dir. Sistemas Mecánicos | Querétaro | México, <https://orcid.org/0000-0002-3648-3839>,

Email: ernesto.chavero@ciateq.mx; <https://orcid.org/0000-0002-1861-5324>, Email: aguesc@ciateq.mx; <https://orcid.org/0009-0003-5516-9663>, Email: antonio.garcia@ciateq.mx

^{b,d,e} CIATEQ, Centro de tecnología avanzada | Dir. Plásticos y Materiales avanzados | Querétaro | México, <https://orcid.org/0000-0001-9375-6832>, Email: carlos.poblano@ciateq.mx; <https://orcid.org/0000-0002-6598-9847>, Email: jcorona@ciateq.mx; <https://orcid.org/0009-0006-9419-3086>, Email: marco.cortina@ciateq.mx.

población mundial vivirá en zonas con escasez de agua, lo que se agrava dado el crecimiento poblacional y la necesidad de producir más alimentos basados en la agricultura, que consume el 70% del agua dulce disponible. [1]

En México, el 94.4% de la población tiene acceso a agua potable, con calidad y disponibilidad variable, lo que se agrava en zonas rurales donde el 30% de la población tiene acceso limitado a agua potable segura. Un porcentaje muy alto de la disponibilidad de agua se ve afectado por fugas en las redes de distribución; tan solo en la cuenca del valle de México se estiman pérdidas del 40%. [2]

La disponibilidad de agua en México es contrastante entre el centro-norte y el sur; en el centro-norte se concentra el 80% de la población y en el sur se concentra el 70% de la disponibilidad del agua, en particular Chiapas y el sur de Veracruz. Sin embargo, a últimas fechas los efectos del cambio climático han producido una severa crisis aun en regiones de alta disponibilidad de agua, provocando una sequía severa durante el primer semestre de 2024. [3]

Debido a lo anterior, la búsqueda de fuentes alternativas y sostenibles de agua potable se ha vuelto una prioridad. Entre las tendencias que se estudian están los medios pasivos para la cosecha de agua con nuevos materiales hidrofílicos y tecnologías bioinspiradas en ambientes con humedades relativas bajas (10 a 40%), así como la condensación de humedad por enfriamiento a través de medios activos con altos consumos de energía. [4]

Una solución prometedora y probada es la captación pasiva de agua atmosférica, en condiciones de alta humedad (90 a 100%). [5]

Estas condiciones se pueden dar en cualquier lugar, con noches húmedas y frías. Esto sucede en zonas altas y boscosas donde es común encontrar niebla; para estas condiciones atmosféricas existen diversas metodologías para recolectar agua, una de ellas se da mediante el uso de atrapanieblas, cuyos diseños van desde simples estructuras hasta sistemas sofisticados que optimizan la eficiencia de recolección. [6]

Tomando como referencia la condensación de agua por atrapanieblas como tecnología ya probada y de costos accesibles, se realiza la presente revisión de la literatura para analizar el estado actual de esta tecnología, en particular utilizando mallas especialmente diseñadas para atrapar y canalizar el agua hacia sistemas de almacenamiento. El objetivo es indagar los métodos de diseño reportados, los materiales empleados y su eficiencia, así como establecer su viabilidad de uso en zonas de baja concentración de humedad atmosférica.

Mallas Atrapaniebla

Una malla atrapaniebla es un sistema utilizado para capturar y recolectar agua presente en la niebla, su uso puede ser especialmente atractivo en regiones áridas o semiáridas donde las fuentes de agua son escasas. La malla tiene una estructura abierta que permite el paso del viento cargado de humedad, pero con suficiente densidad para capturar las microgotas de agua de la niebla. Cuando estas microgotas entran en contacto con la malla, se adhieren a las fibras del material; a medida que más gotas se acumulan en la malla, se agrupan para formar gotas más grandes. Estas gotas, por gravedad, se deslizan hacia abajo por la superficie de la malla y son dirigidas hacia un canal o tubería en la base del dispositivo, donde se almacenan o se conducen a un sistema de distribución. Las mallas están fabricadas de materiales durables, generalmente de polietileno o polipropileno, que es resistente a la intemperie. Las mallas atrapanieblas son relativamente baratas y fáciles de mantener. [7]

En la Figura 1, se muestran las configuraciones de mallas típicas utilizadas como atrapanieblas.

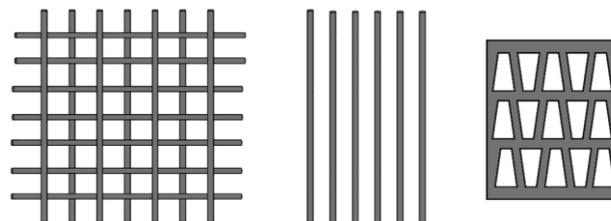


Figura 1. Atrapanieblas a) Malla típica, b) Malla tipo arpa y c) Malla Raschel. [8]

Diseño y modelación de mallas

El diseño y modelación de mallas es fundamental en el desarrollo de las tecnologías para incrementar la eficiencia en la recolección de agua de niebla. La efectividad de la captación depende de la relación entre el tamaño de las aberturas y la densidad del tejido. Mallas con aberturas más pequeñas pueden capturar gotas más pequeñas, pero también incrementan la resistencia al viento. [9]

Park y otros, analizaron cómo los puentes de agua obstruyen los orificios recolectores de niebla; experimentaron con orificios de 2, 5 y 7 mm. Los orificios pequeños obstruían la malla, los medianos la obstruían, pero se rompían con el viento, y los grandes permitían que las gotas quedaran en los marcos. Sin embargo, cuando la malla estaba bloqueada y la velocidad de la niebla superaba los 4 m/s, se logró una alta eficiencia de

recolección debido a la inercia de las partículas de niebla que impactan la pared bloqueada. [10]

Mukhopadhyay y otros, experimentaron cómo minimizar la obstrucción de la malla clasificando patrones de obstrucción y no obstrucción, encontrando que poros cuadrados con diámetros de fibra pequeños son más eficaces que mallas entrelazadas, las cuales bajan su eficiencia de captación debido a la aerodinámica de la niebla. [11]

Kowalski y otros, probaron en mallas de niebla tipo arpa, utilizando alambre de acero inoxidable sin recubrimiento y con recubrimiento, concluyendo que el alambre es el mejor material hidrófilo, tan efectivo como los recubiertos de teflón. Se verificó también que longitudes de hilos más largas causan enredamientos, sobre todo en pasos más grandes; también se verificó que al aumentar el número de hilos por unidad de área se mejora la condensación, pero se reduce el flujo de aire, disminuyendo la eficiencia de recolección. [12]

Elshennawy y otros, aplicaron una técnica matemática sencilla para calcular el coeficiente de sombra (relación área de paso libre de aire/área total) más eficiente para la captación de niebla en diversas mallas. Se evaluaron cinco geometrías: malla rectangular, cuadrada, *Raschel*, triangular y hexagonal, concluyéndose que el coeficiente de sombra óptimo está entre 50% y 60%. [13]

Singh y otros, analizaron los factores que influyen en la condensación de aire húmedo; utilizaron una Modelación Interpretativo Total y un procedimiento de análisis para categorizar los factores que influyen en la condensación de agua, concluyendo que los factores dominantes son el revestimiento de la superficie, la geometría de la malla y el material, superando en importancia a las características físicas tales como la humedad relativa, la temperatura ambiental, la velocidad del aire húmedo, la conductividad térmica y la dinámica de las gotas. [14]

Para maximizar la captación de niebla, la malla debe orientarse perpendicularmente a la dirección del viento. Un ángulo óptimo de inclinación facilita el escurrimiento del agua hacia los sistemas de recolección. Ghosh recolectó niebla de torres de enfriamiento industriales usando malla metálica y estimó los efectos aerodinámicos mediante análisis computacional. La configuración óptima se logró con una inclinación de 15° respecto a la vertical, mejorando la eficiencia de recolección hasta 16% en comparación con un ángulo plano. [15]

En la Figura 2, se muestra el efecto de la inclinación de la malla para el desprendimiento de partículas por gravedad.

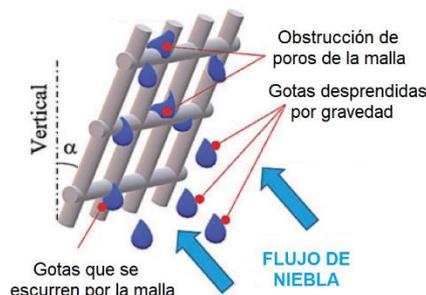


Figura 2. Goteo prematuro de gotas más grandes debido a la gravedad. [15]

La modelación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite simular la interacción del aire y las partículas de niebla con la malla, ayudando a identificar el diseño que maximiza la recolección de agua. Esta técnica permite probar diferentes combinaciones de porosidad y densidad de hilos, encontrando el equilibrio óptimo entre captura de niebla y flujo de aire. Montoya y otros, mediante CFD desarrollaron una metodología económica para simular el flujo de niebla a través de una malla y un medio poroso. En condiciones confinadas mostraron diferencias del 2,8% y 7,2%, respectivamente. En condiciones abiertas, las diferencias fueron menores al 5%, y el error en el caudal fue cercano al 9%. Concluyeron que el modelo de medio poroso es una metodología válida para simular el flujo a través de una malla, con menores costos computacionales. [16]

Silva-Llanca y otros, realizaron un análisis CFD de la eficiencia aerodinámica de colectores en forma de V. El análisis lo realizaron utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes. La malla del colector de niebla se modeló como un medio poroso utilizando el método *Porous Jump*, mientras que la eficiencia aerodinámica se calculó utilizando el enfoque de *Particle Tracking*. Se obtuvieron mejoras de 46% respecto a una malla recta. [17]

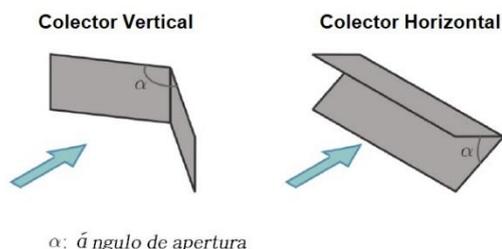


Figura 3. Colectores de agua de niebla en forma de V. [17]

Mosa y otros, estudiaron el impacto de los distintos diseños de colectores de niebla bajo fluctuaciones en la velocidad y dirección del viento. En regiones con

direcciones constantes del viento el diseño cuadrado resulta más eficaz. Por el contrario, en áreas con patrones de viento fluctuantes, el diseño cilíndrico es una mejor opción. [18]

Kim y otros, lograron mejorar el rendimiento de captación de agua mediante modificación de colectores, experimentado en torres de enfriamiento industriales. Primero, se adoptó una forma cóncava para la malla, para tener una mejor área de captación. Se instaló una pared lateral para recolectar niebla adicional y se cambió la dirección de descarga del flujo. Las eficiencias de recolección son del 9,61 % cuando la ruta de flujo de descarga es bidireccional y del 10,05 % cuando viaja solo en una dirección. [19]

Materiales y recubrimientos

Los recubrimientos y materiales utilizados en las mallas atrapanieblas son fundamentales para optimizar su eficiencia y durabilidad. Estos elementos están diseñados para maximizar la captación de agua de la niebla y resistir las condiciones ambientales adversas. Para seleccionar el material óptimo se han realizado diversas investigaciones. Sun y otros, utilizaron membranas de malla para el transporte direccional de gotas controlando el estado de humectación de la superficie con estructuras submilimétricas. Se presenta una estructura de pila de filamentos impresos de dióxido de silicio para adquirir el estado de humectación deseado, que se puede cambiar según sea necesario incorporando el hinchamiento del filamento. [20]

Knapczyk-Korczak y otros, trabajaron con nanofibras hidrófilas de poliamida 6 las cuales se depositaron directamente en mallas Raschel para crear una estructura sobrepuesta que aumenta el área de superficie efectiva. Esto permitió una recolección de agua 3 veces mayor respecto a una malla Raschel sin recubrimiento. [21]

Knapczyk-Korczak y otros, usaron mallas compuestas a base de fibra electrohilada y humectadas con poliestireno hidrofóbico y poliamida 6 hidrofílica. La combinación de ambos materiales mejoró la eficiencia de recolección de agua en 40%. [22]

Jin y otros, diseñaron una estructura de nanoagujas de óxido de cobalto en la superficie de la malla de cobre mediante síntesis hidrotermal. Esto favorece la unión del aire y la agregación de gotas de agua ya que puede mantener eficazmente la humectación por mayor tiempo, lo que mejora la eficiencia de recolección. [23]

Knapczyk-Korczak y otros, incorporaron fibras de fluoruro de polivinilideno electrohiladas, mejorando la eficiencia de recolección de agua de la malla Raschel en más de un 300%. [24]

En la Figura 4, se muestra un ejemplo de la aplicación sobrepuesta de nanofibras en un tipo de malla.

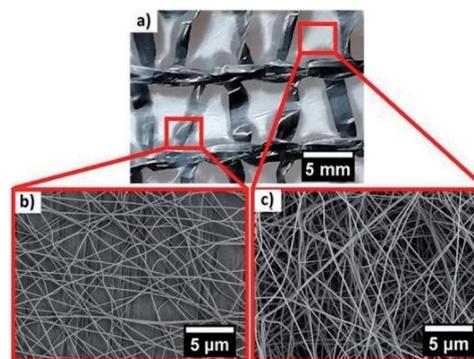


Figura 4. Nanofibras depositadas sobre malla. a) Malla Raschel, b) Nanofibras depositadas en la cinta, c) Nanofibras entre las cintas. [21]

Lee y otros, aplicaron humectabilidad superhidrofílica con poli (ácido láctico) mediante tratamiento de plasma a una malla Janus con orificios de tamaños variables. Concluyeron que, en mallas con orificios chicos, el transporte capilar de agua, impulsado por el gradiente de humectabilidad en la dirección del flujo de niebla, mejora el drenado, lo que permite recolectar más niebla. [25]

Gürsoy y Kocadayıoğulları, transformaron telas de polipropileno recubriéndolas con películas poliméricas mediante deposición química de vapor mejorada con plasma. Se sintetizaron películas delgadas de poli (ácido acrílico) y poli (acrilato de hexafluorobutilo) logrando polímeros hidrófilos e hidrófobos. [26]

Elshennawy y otros, realizaron dos experimentos. Primero, usaron pintura acrílica y ambientador Glade con fragancia de vainilla para recubrir una malla de aluminio, se mezclaron cuando ambos se rociaron. Se obtuvo una mejora de 101% respecto a una malla sin revestimiento. Se demostró que el revestimiento utilizado puede clasificarse como hidrófobo. Segundo, se probaron dos mallas de ácido poli láctico con diferentes ángulos de eje para la recolección de niebla. Se mostró que inclinar la malla en un ángulo de 30° redujo la tasa de recolección de niebla en un 48,3%. [27]

Wu y otros, utilizaron nanoestructuras de óxido de zinc cultivadas mediante un proceso hidrotermal sobre una malla de acero inoxidable, que luego se modificó con ácido esteárico. Controlando la humectabilidad de la

superficie se obtuvieron tres tipos de mallas con diferentes comportamientos de transporte de agua: modo Janus, modo híbrido y modo Janus e híbrido; siendo el modo híbrido la malla de mayor captación de hasta 2.6 veces más que el modo Janus. [28]

Bae y otros, analizaron la dinámica de penetración del agua en una malla Janus con humectabilidad opuesta, super hidrofóbica en un lado con dióxido de silicio e hidrofílica en el otro con dióxido de titanio. Se demostró que la dinámica consta de dos eventos: impulsada por presión dinámica en tiempos cortos e impulsada por presión capilar en tiempos largos. [29]

La Figura 5, muestra el proceso de recubrimiento por pulverización.

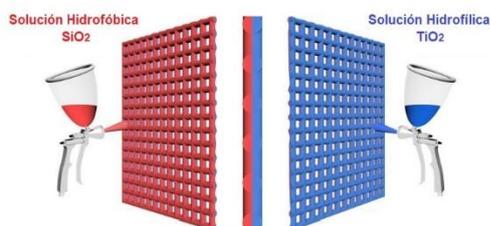


Figura 5. Esquema de la fabricación del recubrimiento por pulverización de la malla Janus. [29]

Basal y Oral mejoraron la capacidad de recolección de agua en una malla de alambre de acero inoxidable modificando su superficie utilizando una estructura de zonas hidrofílicas a partir de la mezcla de poliamida 6 con quitosano mediante electrohilado. Se obtuvo una mejora cerca del 100% respecto a una malla sin recubrimiento. [30]

Gou y Guo, fabricaron una superficie recubierta de patrones químicos alternados hidrófilos e hidrófobos de óxido de cobre y dióxido de titanio. Se utilizó fotocatalisis de dióxido de titanio mediante irradiación ultravioleta. La malla de cobre híbrida de doble revestimiento mejoró la eficiencia de recolección de niebla en comparación con la superficie uniforme superhidrofóbica o superhidrofílica. [31] Knapczyk-Korczak y otros, combinaron dos polímeros para crear una estructura Janus a partir de poliestireno hidrofóbico y acetato de celulosa hidrofílico. Estas fibras, con una forma de canal, fueron electro hiladas mediante un sistema de boquilla lateral. Demostraron que no solo aumentó la efectividad de captación de agua, también aumentó la resistencia de la malla. [32]

Huan y otros, utilizaron mallas electrohiladas de fluoruro de polivinilideno, cuya humectabilidad se controla mediante la adición de dióxido de titanio. La malla

electrohilada se puede convertir de hidrofóbica a hidrofílica bajo irradiación UV y volver a transformarse a un estado hidrofóbico con tratamiento térmico. [33]

Showket y otros, aplicaron tratamientos superficiales como grabado químico y deposición de vapor a presión atmosférica sobre mallas de acero inoxidable para alterar la humectabilidad. Se obtuvo un mejor desempeño que con las mallas de acero inoxidable sin tratar. [34]

Wang y otros, construyeron una superficie superhidrofóbica con hidrofílicidad a nanoescala ajustable, construida mediante emulsiones estructuradas de Pickering. Se demostró que la tasa de deposición y eliminación de gotas podía manipularse mediante la hidrofobicidad y la densidad de los nanodominios hidrofílicos. Se logró una mejora de más del doble en la tasa de recolección de agua en comparación con las superficies superhidrofóbicas. [35]

He y otros, diseñaron y sintetizaron nanoestructuras de óxido de cobre en una malla de cobre mediante un método de oxidación de un solo paso. Su morfología y la humectabilidad de la superficie se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido y la medición del ángulo de contacto dinámico. [36]

Ghosh y otros, mediante tratamiento superficial de mallas de acero inoxidable por grabado químico húmedo y aplicando deposición electroforética de nanopartículas de dióxido de titanio, alteraron la humectabilidad de las mallas volviéndolas superhidrofílicas, hidrofílicas o superhidrofóbicas. [37]

El-Maghraby y otros, recubrieron membranas de malla mediante un procedimiento de inmersión simple con diversos grados de estructura híbrida TiO_2 -PMMA que proporciona una estructura compuesta de grados mixtos de humectabilidad. Recolectaron agua de la niebla a una razón de 32 a 45 L/m² por hora. [38]

Zhang y otros, utilizaron nano estructuras de óxido de Zinc alineados verticalmente. Primero se sintetizan mediante un método hidrotermal y se depositan sobre ellas nanopartículas de óxido de hierro mediante inmersión. Después de una modificación del alquilmercaptano, la superficie híbrida presenta un rápido efecto de captura de niebla y una alta eficiencia de eliminación de gotas. [39]

Guo y otros, usaron una membrana con una morfología cóncava-convexa y humectabilidad híbrida mediante la modificación química del sustrato de PAN (poliacrilonitrilo) superhidrofílico con 1H, 1H, 2H, 2H-perfluorooctiltriclorosilano usando una malla de hierro como cubierta, mejorando la eficiencia de recolección. [40]

Ghosh y otros, usaron la actividad foto-catalítica de nanopartículas de dióxido de titanio y óxido de zinc depositadas electroforéticamente, mejorando la recolección de agua de niebla. [41]

Técnicas innovadoras de recolección

La innovación en las técnicas de recolección de niebla con mallas ha avanzado significativamente, mejorando la eficiencia y adaptabilidad de estos sistemas en diversas condiciones climáticas. De igual manera, en la literatura se pueden identificar nuevas técnicas para lograr que las mallas adquieran propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas. Una de las técnicas prometedoras es una malla en tipo arpa con diversas capas.

Shi y otros, utilizaron electroerosión por hilo para mecanizar paquetes de peines ultrafinos; enrollaron alambre del arpa a lo largo del peine obteniendo un coeficiente de sombra del 50%. En la Figura 6 se muestra la técnica del armado de la malla tipo arpa con una y dos capas. [42]



Figura 6. Izq. Armazón del arpa de niebla antes de enrollar el alambre. Der. arriba configuración a una capa. Der. abajo, configuración a dos capas. [42]

Nguyen y otros, emplearon mallas de filamentos verticales tipo arpa, con multicapas tridimensionales, modificados con una solución de mezcla de poliuretano y alginato de sodio mediante pulverización simple. Se realizó experimentación con 4 capas y la eficiencia de recolección de niebla aumentó entre 30 y 80 %. [43]

Shi y otros, emplearon un arpa de acero inoxidable de 0.254 mm de diámetro imitando el arreglo de hilos de una máquina de hilar. Se verificó que es más efectiva en condiciones de niebla ligera respecto a una malla de 2 hilos por pulgada, ya que colecta entre 2 y 78 veces más agua. [44]

Zhang y otros, fabricaron una malla de membrana multibiomimética compuesta de nanofibras de poliuretano con nanoesferas de carbono hidrofílicas y nanotubos de carbono anclados en la superficie. La eficiencia de recolección alcanzó 1666,2 mg/cm² por hora. [45]

Hoque y otros, fabricaron superficies híbridas (hidrofilia e hidrofobicidad) con patrones puntuales en forma de rejilla mediante estampado. Se logró un 37% mayor recolección en comparación con una superficie superhidrofoba, ya que la microgota de agua se propaga a una velocidad 160% mayor. [46]

Chen y otros, implementaron procesos de fotolitografía, litografía de nanoimpresión y galvanoplastia de oro, níquel y cobre para permitir un espesor de membrana ultrapequeño en la superficie de una membrana Janus de acero inoxidable. Se obtuvo una membrana ultrafina de 4 μm de espesor con un paso de 60 μm, que logra una tasa de recolección de agua de 233 mg/cm² por minuto. [47]

Lee y otros, diseñaron un colector de niebla hidrófilo de nanocanales y macrorrayas, impreso por rodillos moleteados, que permite la caída de agua para mejorar la eficiencia de la recolección de niebla. Con ello se mejoró recolección de niebla en un 50 % en comparación con los colectores de niebla convencionales tipo malla. La Figura 7, muestra el proceso de impresión por moleteado. [48]

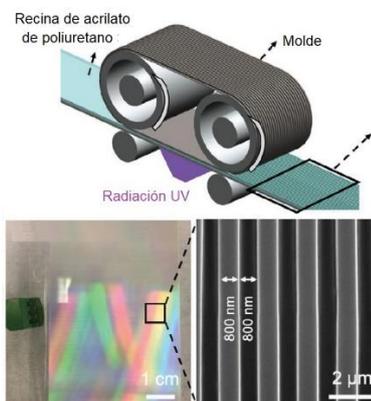


Figura 7. Arriba. Proceso de nanoimpresión. Abajo, estructura de nanocanales. [48]

Deng y otros, mediante una combinación del método de plantilla y la técnica de fotocurado, desarrollaron estructuras inspiradas en cactus sobre una malla de cobre para mejorar la coalescencia y el transporte de gotas. La eficiencia de recolección de agua alcanza los 17,7 kg-h/m². [49]

He y otros, inspirados en las estructuras de los cactus y las hojas de pino tipo aguja, adhirieron microestructuras

de óxido cúprico sobre una superficie de espuma de cobre. A través de un proceso de síntesis, se forman nanocables sobre la esponja que forman una nanomalla y nanofojas. La eficiencia de recolección puede alcanzar una tasa de hasta 34,6 mg/cm²*s. [50]

Singh y Sikarwar fabricaron superficies metálicas de malla hidrofóbica mediante un proceso de difusión térmica en el que una malla de cobre con hilos de 6 µm de diámetro se difunden térmicamente sobre una superficie de acero de grado 100. La superficie preparada se grabó químicamente antes del recubrimiento con hexadeciltrimetoxisilano mediante un método de inmersión para hacer crecer una nanoestructura de sílice. La superficie metálica de malla hidrofóbica presentó una alta eficacia para la condensación de aire húmedo en comparación con la superficie metálica de malla difundida térmicamente sin recubrimiento. [51]

Gu y otros, desarrollaron un sistema de recolección de niebla autoalimentado mediante la integración de plasma triboeléctrico (fricción de materiales), aprovechando las cargas eléctricas inyectadas en el flujo de niebla. Al dotar a la malla de superhidrofobicidad, el agua recogida en ella se desprende rápidamente, lo que garantiza una rápida regeneración del sistema de recolección de niebla. La tasa final de recolección de agua alcanza 1311,79 g/(m².min), con una eficiencia de conversión de niebla/agua del 55,5%. La Figura 8, muestra un esquema de esta propuesta. [52]

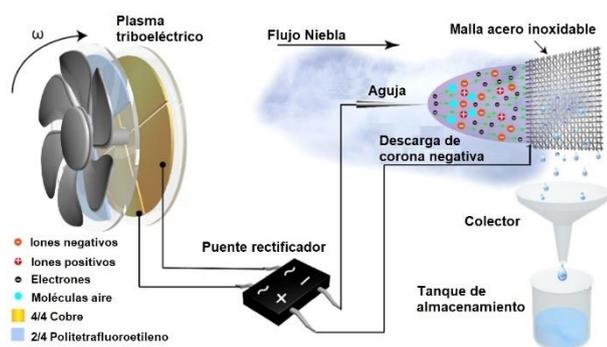


Figura 8. Esquema de la carga espacial inyectada con plasma triboeléctrico para un sistema de recolección de niebla. [52]

Li y otros, recolectaron niebla mediante el acoplamiento de plasma, utilizaron nanopartículas de tungsteno para forrar tanto el electrodo de descarga como el electrodo colector del micro/nano-colector de niebla electrostático. Para el electrodo colector se propuso una estructura compuesta (hidrofóbica/hidrofílica) que disminuye las gotas

acumuladas en ambos lados, lo que evita los residuos de gotas y el bloqueo de la malla en la estructura general. [53] Jin y otros, inspirados en la estructura del sisal (fibra de agave), diseñaron una estructura multietapa de nanoagujas de óxido de zinc en una malla de cobre mediante un método de campo eléctrico de dos pasos. Esta combinación permitió una condensación más rápida y permite la estructura de múltiples niveles de colectores de niebla. [54]

Li y otros diseñaron una estructura colectora de electrodos múltiples que puede lograr una recolección de agua independiente de la dirección. La estructura de múltiples electrodos de cobre consta de tres partes: un electrodo de carga, un electrodo interceptor y un electrodo de tierra. La tasa de recolección resultante es de 100 a 150 veces mayor que la de una malla de niebla tradicional y de 2 a 4 veces mayor que la de un electrodo de malla de alambre de acero. [55]

Jiang y otros, diseñaron un colector de niebla de alambres de acero inoxidable de dos etapas; se utilizaron electrodos de cobre de descarga, repulsión y recolección para inducir descarga eléctrica. Se estudia experimentalmente la influencia del tamaño de la malla, el número de electrodos de la malla y el campo eléctrico. Los resultados muestran que la eficiencia de recolección del colector de niebla electrostático es mayor a 92.4% cuando se aplica un voltaje de descarga adecuado. [56]

Parisi y otros, desarrollaron un dispositivo multifuncional de fluoruro de poli vinilideno capaz de recolectar agua y electricidad del viento, recolectando hasta 365 mg cm² h⁻¹ de agua de niebla. Debido a la naturaleza piezoeléctrica del dispositivo electrohilado, estos hilos y mallas no solo sirven como sensores piezoeléctricos, lo que permite detectar el flujo de niebla entrante y determinar su velocidad, sino que también recolectan electricidad cargando un condensador, convirtiéndola en una energía verde y renovable. [57]

Sharifvaghefi y Kazerooni combinaron tres técnicas de recolección. Se utiliza una serie de alambres verticales de acero inoxidable, se agrega una capa hidrofóbica a los alambres basada en la hidrólisis y polimerización de dimetildimetoxisilano catalizada por ácido sulfúrico y se obliga a las gotas ionizadas a moverse hacia los alambres mediante la aplicación de un campo eléctrico. La aplicación del recubrimiento aumentó la eficiencia 62%; y 82% con la carga eléctrica respecto a la malla sin recubrimiento. [58]

Li y otros, se inspiraron en el transporte direccional de las gotas de agua hasta el ápice en los picos de las aves

playeras y en las aristas del trigo. Crearon una red de aleación de cobre, oxígeno y estaño usando el método de electrodeposición, con una geometría asimétrica en forma de V. Obtuvieron una mayor recolección de agua mediante un drenaje eficiente a lo largo de las líneas de recolección comparado con mallas de acero sin recubrimiento. [59]

Por último, Zhu y otros, diseñaron fibras de diatomita-alginato con asimetría sinérgica en su forma (jorobas y valles) y modificando la rugosidad y química de la superficie. Se inspiraron en la forma rugosa de la hoja de Gunnera para mejorar la deposición de niebla, la rugosidad superficial de la hoja de Cotula para lubricar el camino para el rápido drenaje del agua y la humectabilidad heterogénea del escarabajo del desierto de Namib para promover el transporte direccional de agua para salvar la deposición de niebla. Estas fibras logran una tasa de recolección de niebla de $8,2 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, una mejora siete veces mayor que con fibras de hilo cilíndrico y simétrico. En la Figura 9, se muestra el proceso bioinspirado para captación de niebla. [60]

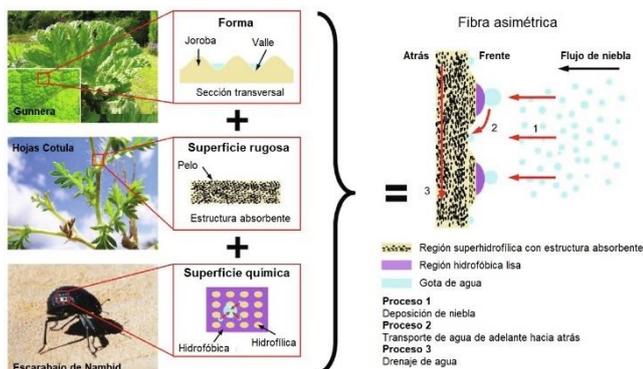


Figura 9. Diseño bioinspirado de fibras asimétricas. [60]

Desafíos en la recolección de niebla

La recolección de niebla es una tecnología prometedora para combatir la escasez de agua, pero enfrenta diversos desafíos técnicos, económicos y sociales que deben ser superados para garantizar su viabilidad y eficiencia a largo plazo. La disponibilidad de niebla puede variar considerablemente según la estación, el clima y la geografía, lo que añade complejidad al aprovechamiento de esta tecnología. En algunas regiones, la niebla puede no ser lo suficientemente densa o frecuente como para justificar la instalación de sistemas de recolección, y solo se justifican aquellos sistemas pasivos de diseño rústicos. Otro desafío entre técnico y económico es que

se deberán implementar sistemas con grandes áreas de captación para lograr volúmenes razonables de agua.

En cuanto al diseño, las mallas deben tener una estructura que maximice la captación de agua, pero al mismo tiempo, permitir que el aire pase a través sin crear demasiada resistencia. Encontrar un equilibrio entre estas dos necesidades es un desafío continuo en el diseño de mallas. La dirección y velocidad del viento son cruciales, las mallas deben estar orientadas correctamente para interceptar la mayor cantidad de niebla posible. Cambios en las condiciones del viento pueden reducir la eficacia del sistema. El diseño del sistema de canalización es crítico para minimizar las pérdidas de agua durante su transporte desde la malla hasta el sistema de almacenamiento. Un diseño ineficaz puede llevar a pérdidas significativas de agua recolectada, la cual puede evaporarse antes de ser almacenada.

Las mallas expuestas al sol, viento, y la salinidad del ambiente pueden degradarse con el tiempo, perdiendo eficacia y requiriendo reemplazos frecuentes. Los materiales también deben resistir la corrosión y la acumulación de sales y partículas. Las mallas pueden obstruirse con polvo, arena, o materiales biológicos como algas y musgo. Esto reduce la eficiencia de captura y puede aumentar la necesidad de mantenimiento regular, lo que implica mayores costos y mano de obra.

Aunque las mallas atrapanieblas son generalmente más económicas que otras tecnologías de recolección de agua, los costos iniciales de instalación y los costos continuos de mantenimiento pueden ser un obstáculo, especialmente en comunidades con recursos limitados. En algunas áreas, la tecnología puede ser nueva o desconocida, lo que requiere esfuerzos significativos para educar y convencer a las comunidades locales sobre su uso y beneficios. Se necesitan más estudios a largo plazo para comprender mejor la durabilidad de las mallas, la eficiencia en diferentes condiciones climáticas y las mejores prácticas para el mantenimiento y la operación.

Escalar la tecnología para satisfacer las necesidades de grandes poblaciones puede ser desafiante. El espacio disponible para instalar mallas y la capacidad de los sistemas para capturar suficiente agua para grandes comunidades son limitaciones significativas. Aunque la

recolección de niebla es una técnica ecológica, la instalación de grandes estructuras en ciertos ecosistemas sensibles podría tener impactos ambientales no deseados, como la alteración de los ecosistemas locales.

Existe una necesidad continua de desarrollar materiales que sean más eficientes, duraderos y económicos. Las innovaciones en nanotecnología y biomimética han mostrado potencial, pero aún hay desafíos en la implementación a gran escala. La integración de la recolección de niebla con otras tecnologías de recolección de agua o de generación de energía es un área prometedora, pero presenta desafíos técnicos y financieros significativos.

Aunque se han hecho avances en la simulación del flujo de aire y la recolección de niebla, aún es necesario mejorar los modelos para predecir con precisión el rendimiento de las mallas en diversas condiciones ambientales.

Conclusiones

La instalación de una malla atrapanieblas puede ser una solución viable para capturar agua en zonas donde las condiciones ambientales son propicias, los costos en la instalación y mantenimiento son relativamente bajos; y son adaptables ya que puede implementarse en diversas orografías y climas, especialmente en zonas montañosas y costeras donde la niebla es abundante.

La eficiencia de captación depende de varios factores, como el tipo de malla, la densidad de la niebla, la velocidad del viento y la orientación de la instalación. Investigaciones recientes han mostrado mejoras significativas en los diseños de las mallas, aumentando la eficiencia de recolección y la durabilidad de los materiales. La captación de agua de niebla mediante mallas se perfila como una solución prometedora para enfrentar la crisis hídrica global de manera eficiente y sostenible.

Se tienen avances importantes desde el punto de vista científico, que analizan diversos recubrimientos hidrofílicos e hidrofóbicos aplicados sobre sustratos de fibras captadoras en polímeros y aceros, así como el uso de conceptos para atrapar humedad en hojas, espinas y superficies de animales del desierto, mostrando por ahora viabilidad técnica. Análisis recientes más profundos del fenómeno de captura de humedad atmosférica, se están centrando en el desarrollo, aplicación y evaluación de nanomateriales y nano fibras que promueven la atracción o repulsión de humedad, así como de efectos químicos que promueven la fotocatalisis.

Referencias

- [1] Organización Mundial de la Salud (OMS) y UNICEF. Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000-2020: Five years into the SDGs. 2021.
- [2] Expansión. Se pierde más agua por fugas que la que llega al Cutzamala. UNAM. Obras por expansión ¿Qué porcentaje del agua potable en México se desperdicia por fugas? (expansion.mx). 2024
- [3] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Estadísticas del Agua en México. 2022.
- [4] Atencio, R., Briceño, A., Cosecha de humedad atmosférica: Nuevos materiales y tecnologías bioinspirados para mitigar la escasez de agua. Ciencia en Revolución, 9, 25. 2023.
- [5] Bautista, A. L., Mendoza, M., Cruz, F., Álvarez, C. R., Duarte, H. F., Potencial de captura de agua atmosférica en el noroeste de México. Interciencia, 43, 10. 2018. (interciencia.net).
- [6] Azeem, A., Noman, M. T., Wiener, J., Petru, M., Louda, P. Structural design of efficient fog collectors: A review. Environmental Technology & Innovation, 20, 101169. 2020.
- [7] Qadir, M., Jiménez, G. C., Farnum, R. L., Dodson, L. L., Smakhtin, V. Fog Water Collection: Challenges beyond Technology. Water. 10(4), 372. 2018.
- [8] Raveesh, G., Goyal, R., Tyagi, S. K. Advances in atmospheric water generation technologies. Energy Conversion and Management. 2021. 239, 114226.
- [9] Hadba, L., Mendonça, P., Silva, L.-T., Carvalho, M.-A. Selecting Fog Harvesting Meshes for Environmental Conditioning Structures. International Journal of Environmental Science and Development. 11, 12, 540-548, 2020.
- [10] Park, J., Lee, C., Lee, S., Cho, H., Moon, M.-W., Kim, S.-J. Clogged water bridges for fog harvesting. Soft Matter. 17, 136-144. 2021,
- [11] Mukhopadhyay, A, Datta, A, Dutta, PS, Datta, A, Ganguly, R. Droplet Morphology-Based Wettability Tuning and Design of Fog Harvesting Mesh to Minimize Mesh-Clogging. Langmuir. 40(15), 8094-8107. 2024.
- [12] Kowalski, N.G, Shi, W, Kennedy, B.S, Boreyko, J.B. Optimizing Fog Harps. ACS Applied Materials & Interfaces. 13, 32. 2021.
- [13] Elshennawy, A.A., Abdelaal, M.Y., Hamed, A.M. Evaluating Mesh Geometry and Shade Coefficient for Fog Harvesting Collectors. Water Resour Manage. 37, 6107–6126. 2023.
- [14] Singh, P., Sikarwar, B., Modelling and Analysis of Factors Affecting Moist Air Condensation on MeshLike Surface for Sustainable Water Harvesting. Journal of Engineering Research. 2021
- [15] Ghosh, R, Ganguly, R. Fog harvesting from cooling towers using metal mesh: Effects of aerodynamic, deposition, and drainage efficiencies. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 234(7), 994-1014. 2020.
- [16] Montoya, D., Wolfram, J., Rivera, J., Using a porous medium model to simulate the air flow through fog water collectors. Journal of Porous Media. 23. 2020

22 –25 de octubre de 2024

- [17] Silva-Llanca, L., Carvajal, D., Larraguibel, D., González, B., A CFD study of the aerodynamic efficiency of V-shaped fog water collectors. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 107, 109382. 2024.
- [18] Mosa, M., Radwan, F., Al-Ghobari, H. Fouli, H., Ali-Alazba, A. Impact of varied fog collector designs on fog and rainwater harvesting under fluctuating wind speed and direction. *Earth Sci Inform* 17, 617–631. 2024.
- [19] Kim, J.-Y., Kang, J.-H., Moon, J.-W., Jung, S.-Y. Improvement of water harvesting performance through collector modification in industrial cooling tower. *Scientific Reports (Nature Publisher Group)*. 12, 4685. 2022.
- [20] Sun, H., Tian, W., Sun, Y., Li, M. 3D-printed mesh membranes with controllable wetting state for directional droplet transportation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 638, 128143. 2022.
- [21] Knapczyk-Korczak, J., Szewczyk, P.K., Ura, D.P., Berent, K., Stachewicz, U. Hydrophilic nanofibers in fog collectors for increased water harvesting efficiency. *RSC Adv*. 10, 22335-22342. 2020.
- [22] Knapczyk-Korczak, J., Ura, D.P., Gajek, M., Berent, K., Bernasik, A., Chiverton, J.P., Stachewicz, U. Fiber-based composite meshes with controlled mechanical and wetting properties for water harvesting. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 12, 1, 1665–1676. 2020.
- [23] Jin, L.-L., Zhang, J.-Y., He, Z.-C., He, W.-X., Sun, C., Chu, Z.-W., Wang, X.-W., Yuan Z.-H. Constructing CoO Nanoneedle Hierarchical Structure Based on Cassie States for Highly Efficient Fog Harvesting. *Nano Brief Report*. 17, 05, 2250035. 2022.
- [24] Knapczyk-Korczak, J., Szewczyk, P.K., Ura, D.P., Bailey, R.J., Bilotti, E., Stachewicz, U. Improving water harvesting efficiency of fog collectors with electrospun random and aligned Polyvinylidene fluoride (PVDF) fibers. *Sustainable Materials and Technologies*. 25, e00191. 2020.
- [25] Lee, J.H., Lee, Y.Jin., Kim, H.-Y., Moon, M.-W., Kim, S.J. Unclogged Janus Mesh for Fog Harvesting. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14 (18), 21713-21726. 2022.
- [26] Gürsoy, M., Kocadayıoğulları, B. Environmentally friendly approach for the plasma surface modification of fabrics for improved fog harvesting performance. *Fibers polym* 24, 3557–3567. 2023.
- [27] Elshennawy, A.A., Abdelaal, M.Y., Hamed, A.M. et al. Fog collection rate investigation for a hydrophobic surface and different inclinations of rectangular meshes. *Euro-Mediterr J Environ Integr*. 2024.
- [28] Wu, J., Yan, Z., Yan, Y., Li, C., Dai, J. Beetle-inspired dual-directional janus pumps with interfacial asymmetric wettability for enhancing fog harvesting. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 14, 43, 49338–49351. 2022.
- [29] Bae, C., Oh, S., Han, J., Nam, Y., Lee, C., Water penetration dynamics through a Janus mesh during drop impact. *Soft Matter*. 16, 6072-6081. 2020.
- [30] Başal, G., Oral, N. A hydrophilic/hydrophobic composite structure for water harvesting from the air. *Textile and Apparel*, 32(4), 384-389. 2022.
- [31] Gou, X., Guo, Z., Hybrid hydrophilic–hydrophobic CuO@TiO₂-coated copper mesh for efficient water harvesting. *Langmuir*. 36, 1, 64–73. 2020.
- [32] Knapczyk-Korczak, J., Zhu, J., Ura, D.P., Szewczyk, P.K., Benker, L., Agarwal, S., Stachewicz, U. Enhanced water harvesting system and mechanical performance from janus fibers with polystyrene and cellulose acetate. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 9, 1, 180–188. 2021.
- [33] Huan, J., He, Y., Geng, X., Hou, Y., Zheng, Y., Enhanced fog harvesting through programmable droplet movement via bidirectional wettable gradient and microchannel-connected pattern gradient. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 659, 130780. 2023.
- [34] Showket, J., Majumder, S., Kumar, N., Sett, S., Mahapatra, P. S., Fog harvesting on micro-structured metal meshes: Effect of surface ageing. *Micro and Nano Engineering*. 22, 100236, 2024.
- [35] Wang, Y., Zhao, W., Han, M., Guan, L., Han, L., Hemraj, A., Tam, K. H. Sustainable superhydrophobic surface with tunable nanoscale hydrophilicity for water harvesting applications. *A journal of the German chemical society*. 16, 10. 2021.
- [36] He, W.-X. Jin, L.-L., Ma, W.-J., Li, X., Li, J., Wang, X.-W. Wettability contrast on the surface of CuO nanostructures for highly efficient fog harvesting. *Current Applied Physics*. 53, 126-131, 2023.
- [37] Ghosh, R., Patra, C., Singh, P., Ganguly, R., Sahu, R. P., Zhitomirsky, I., Puri, I. K. Influence of metal mesh wettability on fog harvesting in industrial cooling towers. *Applied Thermal Engineering*. 181, 115963. 2020.
- [38] El-Maghraby, H. F., Alhumaidi, A., Alnaqbi, M. A., Sherif, M., Tai, Y., Hassan, F., Greis, Y. E. Bioinspired asymmetric surface property of functionalized mesh to maximize the efficiency of fog harvesting. *ChemNanoMat*. 8, 11. 2022.
- [39] Zhang, Y., Zhong, L., Guo, Z., A hybrid stainless-steel mesh with nano-array structure applied for efficient fog harvesting by tuning wetting, *Chemistry letters*, 49, 1, 79–82. 2020.
- [40] Guo, Y., Li, Y., Zhao, G., Zhang, Y., Pan, G., Yu, H., Zhao, M., Tang, G., Liu, Y. Patterned hybrid wettability surfaces for fog harvesting. *Langmuir*. 39, 13, 4642–4650. 2023.
- [41] Ghosh, R., Sahu, R. P., Ganguly, R., Zhitomirsky, I., Puri, I. K. Photocatalytic activity of electrochemically deposited TiO₂ and ZnO nanoparticles on fog harvesting meshes. *Ceramics International*. 46, 3, 3777-3785. 2020.
- [42] Shi, W, De-Koninck, L.H., Hart, B. J., Kowalski, N. G., Fugaro, A. P., Van der Sloot, T. W., Ott, R. S., Kennedy, B. S., Boreyko, J. B. Harps under heavy fog conditions: superior to meshes but prone to tangling. *ACS Appl Mater Interfaces*. 12(42), 48124-48132. 2021.
- [43] Nguyen, L.t., Bai, Z., Zhu, J., Gao, C., Liu, X., Wagaye, B. T., Li, J., Zhang, B., Guo, J. Three-dimensional multilayer vertical filament meshes for enhancing efficiency in fog water harvesting. *ACS Omega* 6, 5, 3910–3920. 2021.
- [44] Shi, W., Van der Sloot, T. W., Hart, B. J., Kennedy, B. S., Boreyko, J. B. Harps enable water harvesting under light fog conditions. *Advanced sustainable systems*. 4, 6, 2020.
- [45] Zhang, Y., Cai, Y., Shi, J., Morikawa, H., Zhu, C. Multi-bioinspired hierarchical Janus membrane for fog harvesting and solar-driven seawater desalination. *Desalination*. 540, 115975. 2022.
- [46] Hoque, M. J., Yan, X., Qiu, H., Feng, Y., Ma, J., Li, J., Du, X., Linjawı, M., Agarwala, S., Miljkovic, N. Defect-density-controlled phase-change phenomena. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2023.
- [47] Chen, L., Li, W., Gan, Z., Zhou, Y., Chen, M., Cui, D., Ge, H., Chan, P. K. L., Wang, L., Li, W.-D. Ultrathin metal-mesh Janus membranes

with nanostructure-enhanced hydrophobicity for high-efficiency fog harvesting. *Journal of Cleaner Production*. 363, 132444. 2022.

- [48] Lee, J., So, J., Bae, W.-G., Won, Y. The design of hydrophilic nanochannel-macrostripe fog collector: enabling wicking-assisted vertical liquid delivery for the enhancement in fog collection efficiency. *Advanced materials interfaces*. 7, 11. 2020.
- [49] Deng, C., Zhou, W., Li, Y., Lin, M., Dong, L., Zhou, C. Fabrication of cactus-inspired superwetting meshes for highly efficient fog harvesting. *Ind. Eng. Chem. Res.* 63, 15, 6794–6802. 2024.
- [50] He, W.-X., Wang, X.-W., Chu, Z.-W., Ma, X.-J., Sun, C., Zhang, J.-Y. CuO nanomesh hierarchical structure for directional water droplet transport and efficient fog collection. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 657, Part A, 130512. 2023.
- [51] Singh, P. L., Sikarwar, B. S. Fabrication and analysis of hydrophobic mesh-metallic surface for moist air condensation. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(4), 3950–3961. 2022.
- [52] Gu, G., Gu, G., Wang, J., Yao, X., Ju, J., Cheng, G., Du, Z. A water collection system with ultra-high harvest rate and ultra-low energy consumption by integrating triboelectric plasma. *Nano Energy*. 96, 107081. 2022.
- [53] Li, D., Li, C., Zhang, M., Xiao, M., Li, J., Yang, Z., Fu, O., Wang, P., Yu, K., Pan, Y. Advanced fog harvesting method by coupling plasma and micro/nano materials. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 16, 8, 10984–10995. 2024.
- [54] Jin, L.-L., Wang, X.-W., Sun, C., Zhang, J.-Y., He, W.-X., Yuan, Z.-H. Sisal-inspired design of ZnO nanoneedle multistage structure for efficient fog harvesting. *Surfaces and Interfaces*. 25, 101150. 2021.
- [55] Li, D., Li, C., Li, J., Yang, W., Zhang, M., Yang, Y., Yu, K. Efficient direction-independent fog harvesting using a corona discharge device with a multi-electrode structure. *Plasma Sci. Technol.* 24, 095502. 2022.
- [56] Jiang, Y., Xu, R., Liu, S., Liu, G., an, X. Electrostatic fog collection mechanism and design of an electrostatic fog collector with nearly perfect fog collection efficiency. *Chemical Engineering Science*. 247, 117034. 2022.
- [57] Parisi, G., Szewczyk, P. K., Narayan, S., Ura, D. P., Knapczyk-Korczak, J., Stachewicz, U. Multifunctional piezoelectric yarns and meshes for efficient fog water collection, energy harvesting, and sensing. 4, 7. 2024.
- [58] Sharifvaghefi, S., Kazerooni, H. Fog harvesting: combination and comparison of different methods to maximize the collection efficiency. *SN Appl. Sci.* 3, 516. 2021.
- [59] Li, X., Liu, Y., Zhou, H., Gao, C., Li, D., Hou, Y., Zheng, Y. Fog collection on a bio-inspired topological alloy net with micro-/nanostructures. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 12, 4, 5065–5072. 2020.
- [60] Zhu, P., Chen, R., Zhou, C., Tian, Y., Wang, L. Asymmetric fibers for efficient fog harvesting. *Chemical Engineering Journal*. 415, 128944. 2021.