

Capítulo 24

Investigación de recolección de agua con nanotecnología aplicada

Brian Alonso Colorado Samaniego

Alejandro Palomino De La Rosa

Guillermo Amaya Parra

<https://doi.org/10.61728/AE20255411>



Resumen

La nanotecnología está emergiendo como una herramienta revolucionaria en la recolección, tratamiento y purificación de agua, ofreciendo soluciones innovadoras para abordar la crisis hídrica global. La aplicación de nanomateriales, como nanotubos de carbono y grafeno, en tecnologías de filtración y desalinización mejora significativamente la eficiencia del proceso y reduce el consumo energético. Estos nanomateriales permiten la eliminación de contaminantes con menor uso de productos químicos y pueden ser regenerados para reducir desechos sólidos.

Introducción

El agua es un recurso vital para la vida del ser humano, considerando desde la salud pública y la sostenibilidad alimentaria y ambiental. En reconocimiento de su importancia, la Agenda 2030 de las Naciones Unidas estableció dentro de sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible el (ODS) 6: “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”. A pesar de los compromisos internacionales, el avance hacia este objetivo ha sido desigual en los últimos años, con retos que van desde la escasez hídrica hasta la nula y deficiencias en los sistemas de gobernanza institucional.

Evaristo et al. (2023) identifican múltiples desafíos institucionales para el logro del ODS 6, como la fragmentación de políticas, la falta de financiamiento y la ausencia de colaboración intersectorial. Estos factores reducen la eficiencia de los esfuerzos locales y nacionales y subrayan la necesidad de una gobernanza más integradora.

Considerando que la disponibilidad de agua dulce es esencial para la supervivencia humana, la agricultura, la industria y el mantenimiento de ecosistemas saludables. Sin embargo, la creciente escasez de agua se ha convertido en un desafío global, exacerbado por factores como el cam-

bio climático, el incremento poblacional y la degradación ambiental. En numerosas regiones del mundo, la demanda de agua excede la oferta disponible, lo que lleva a conflictos, desplazamientos poblacionales y crisis humanitarias (Stauffer y Spuhler, 2020).

Las tecnologías emergentes basadas en nanotecnología ofrecen soluciones avanzadas para la captación de agua directamente del ambiente, minimizando la necesidad de grandes infraestructuras que ocupen espacio significativo. Frente a este desafío, la recolección de agua ha emergido como una estrategia fundamental, especialmente en áreas donde las fuentes de agua convencionales son limitadas o inaccesibles (Berger, 2023). En los últimos años, la nanotecnología ha cobrado relevancia como una herramienta innovadora y eficiente en este ámbito, con el potencial de transformar la captación, purificación y almacenamiento de agua de manera sostenible (Gonçalves y Marques, 2019; Patel y Joshi, 2022; Ura et al., 2021). Por ejemplo, el uso de nanofiltros ha demostrado mejorar significativamente la eficiencia del filtrado del agua, haciéndola apta para el consumo humano. Además, la investigación en nanomateriales hidrofóbicos ha permitido el desarrollo de recubrimientos para superficies que maximizan la captación y almacenamiento de cada gota de agua, minimizando su desperdicio (Huang et al., 2021; Kim et al., 2020; Yang et al., 2020). También hay que considerar que el sistema de tratamiento de aguas ha dejado de ser un proceso final, pasando a ser una oportunidad para generar agua reutilizable. Al-Gashgari et al. (2024) explican cómo la adopción de tecnologías modernas puede transformar las aguas residuales en un recurso valioso, contribuyendo significativamente al ODS 6.

Objetivos de la investigación

Objetivo general:

Revisar y analizar información bibliográfica y proponer una estrategia de recolección o captación de agua aplicando la nanotecnología, con el objetivo de favorecer al cumplimiento del ODS 6 en comunidades con acceso limitado al recurso hídrico.

Objetivos específicos:

- Investigar avances recientes en nanotecnología aplicada al tratamiento y captación de agua.
- Evaluar la viabilidad de implementar estas tecnologías en contextos rurales.
- Presentar un modelo de captación de agua que incorpore nanomateriales.
- Difundir conocimientos científicos y técnicos que apoyen la sostenibilidad hídrica local.

Metodología

La metodología empleada fue de tipo documental y exploratoria, con revisión bibliográfica de artículos científicos y fuentes oficiales de los últimos cinco años principalmente. Se consultaron bases de datos como Scopus, ScienceDirect y Google Scholar para identificar investigaciones relevantes sobre nanotecnología aplicada al tratamiento y recolección de agua.

Se clasificaron las fuentes en tres categorías:

1. Tecnologías de captación y filtración.
2. Aplicación de nanomateriales (óxidos metálicos, grafeno, entre otros).
3. Proyectos de implementación en comunidades vulnerables.

Marco teórico

Antecedentes

Históricamente, el ser humano ha dependido del agua superficial como fuente primaria de abastecimiento, lo que llevó a la formación de civilizaciones en valles fluviales donde la agricultura y el consumo doméstico se desarrollaron en paralelo con el uso del agua de lluvia. No obstante, con el crecimiento de la población y la expansión a regiones áridas y semiáridas, surgió la necesidad de desarrollar métodos para la recolección de agua de lluvia como una alternativa viable para el riego y el consumo (Stauffer y Spuhler, 2020).

A lo largo de la historia, diversas técnicas de recolección de agua de lluvia han sido empleadas, pero solo recientemente estas tecnologías han sido objeto de estudio y documentación científica. El análisis de restos arqueológicos de obras hidráulicas a nivel global indica que estas tecnologías jugaron un papel crucial en la producción agrícola y el abastecimiento doméstico, especialmente en regiones secas y semiáridas (Berger, 2023). Sin embargo, a pesar de su eficacia, estas tecnologías tradicionales presentan limitaciones que la nanotecnología puede superar.

Estudios recientes han demostrado el potencial de los nanomateriales para mejorar tanto la eficiencia en la recolección como en la purificación del agua, proporcionando una solución viable para enfrentar la escasez de agua en el contexto actual. La integración de estas tecnologías puede representar un avance significativo en la gestión sostenible del agua, contribuyendo a la seguridad hídrica en un mundo cada vez más afectado por la escasez (Gonçalves y Marques, 2019; Ura et al., 2021).

Tabla 1. *Tabla de tecnologías existentes de recolección de agua.*

Tecnologías existentes	Descripción
Recolección de agua de lluvia:	Tanques modulares y sistemas de captación. Capturar y almacenar agua de lluvia por el uso de tanques.
Pozos perforados:	Extracción y agua subterránea. La perforación de pozos de agua potable son obras de captación vertical para explotar el agua freática de los acuíferos, es decir, de las fisuras o intersticios de las rocas del subsuelo.
Captación de aguas superficiales:	Sistemas de recolección de ríos y lagos. La captación de cuerpos de aguas superficiales como ríos, riachuelos, lagos y embalses son estructuras que sirven para captar agua y suministrar de forma continua a una comunidad. El sistema puede hacerse tanto por gravedad, cuando la fuente escogida se encuentra por encima del lugar o a una altitud mayor que el punto de aprovechamiento del agua, como por bombeo, cuando la fuente se encuentre por debajo del nivel donde se encuentran los usuarios.
Zanjas de infiltración:	Técnicas de escorrentía y almacenamiento. Las zanjas de infiltración son excavaciones que se realizan en el terreno en forma de canales de sección rectangular o trapezoidal, que se construyen a curvas de nivel para detener la escorrentía de las lluvias y almacenar agua para los pastos y cultivos instalados debajo de las zanjas.

Tabla 2. *Tabla de potenciales nanotecnologías para la filtración, descontaminación y captación de agua.*

Potenciales nanotecnologías	Descripción
Desalinización de agua de mar por filtración:	Uso de nanotubos de carbono y otras estructuras para mejorar la eficiencia de la desalinización mediante la filtración, con un 80 por ciento de eficiencia para la retención de sal en los nanotubos de carbono.
Recolección de agua atmosférica:	Aplicación de fibras de PC (Policarbonato)electrohiladas y otros materiales hidrofóbicos para recolectar agua de la niebla y el aire.las propiedades superficiales de las fibras de PC(policarbonato) electrohiladas y su efecto sobre la eficiencia de recolección de agua. La química de la superficie y las propiedades mecánicas de las fibras de PC se controlaron mediante la polaridad eléctrica y los niveles de humedad durante el electrohilado para lograr mallas de fabricación en un solo paso para aplicaciones de recolección de agua.
Eliminación de contaminantes en el agua:	Nanocompuestos para la degradación y adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos para extraerlos de manera segura de los cuerpos de agua con el fin de su almacenamiento en represas o canales.

1. Modulares para la captación de agua de lluvia

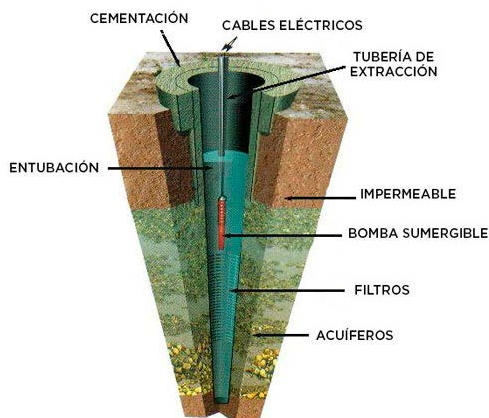
Capturar y almacenar agua de lluvia por el uso de tanques es una excelente alternativa para minimizar el problema de la crisis del agua. El uso racional del agua es cada vez más necesario y, en este contexto, tener una cisterna es una parte fundamental de la solución. Con la captura de agua de lluvia se puede reducir en hasta un 50 % el consumo de agua limpia en una residencia. El agua recolectada se puede utilizar para regar plantas y jardines, lavado de pisos, casas, aparte de uso en la descarga de inodoros. Otro detalle importante es el hecho de que ciertos tipos de tanques aditivo UV y protección antimicrobiana que impiden la proliferación de algas en el tanque, además de ser completamente cerrada, que impide la proliferación del mosquito del dengue. El tanque vertical modular es una solución sostenible, simple y eficaz que puede ayudar a resolver el problema de escasez de agua, especialmente en los centros urbanos donde la falta de espacio y agua crece día a día (Figura 1) (Tecnotri, 2015).

Figura 1. *Modular vertical conectado a canaletas para la recolección de agua lluvia con tecnología anti proliferación de algas*



2. Pozos perforados

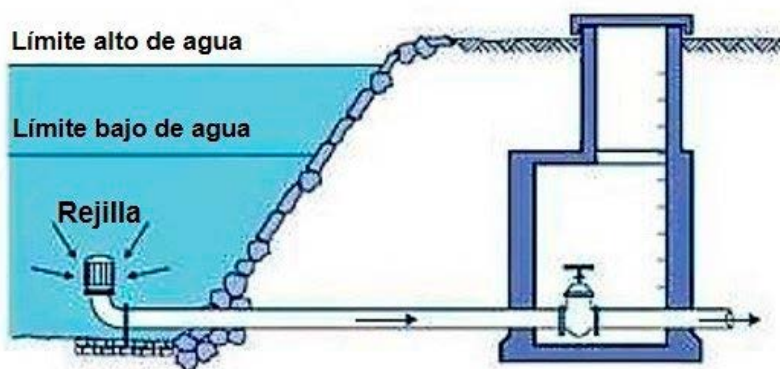
La perforación de pozos de agua potable son obras de captación vertical para explotar el agua freática de los acuíferos, es decir, de las fisuras o intersticios de las rocas del subsuelo. Para ello se utilizan barrenas de perforación de pozos de agua. Una vez excavados, el agua puede ser extraída mediante medios manuales (un cubo o carriola) o mecánicos (una bomba de succión o aspiración) (figura 2). Las aguas subterráneas pueden ser no potables, en caso de contener elevados niveles de sulfatos o sales, o si hay presencia de otros contaminantes químicos o biológicos, por lo cual es recomendable un análisis previo en caso de ser para consumo. Estas perforaciones pueden presentar bastantes diversidades en función de la geología del subsuelo, los volúmenes de agua, de su profundidad y de la pureza que tenga (RS Ingeniería, 2023).

Figura 2. Pozo perforado mecánico con bombeo de agua

3. Captación de agua superficial

La captación de cuerpos de aguas superficiales, como ríos, riachuelos, lagos y embalses, consiste en la construcción de estructuras destinadas a recoger y suministrar agua de forma continua a una comunidad. Este sistema puede funcionar por gravedad, cuando la fuente seleccionada se encuentra a una altitud mayor que el punto de uso, o mediante bombeo, cuando la fuente se encuentra por debajo del nivel de los usuarios. Los tipos de captación de agua varían en función de las características de la fuente, como el caudal requerido, y de las características geológicas, hidrológicas y topográficas de la zona. La calidad del agua en estos cuerpos puede verse influenciada por procesos naturales de autopurificación, como la aireación, procesos bioquímicos, y la sedimentación de sólidos en suspensión. En general, el agua puede ser clara, con bajo contenido orgánico y alta saturación de oxígeno, aunque la contaminación humana y animal puede representar un riesgo cerca de la orilla. A cierta distancia, el agua de los lagos suele tener baja densidad de bacterias y virus patógenos. Sin embargo, las algas pueden estar presentes, especialmente en las capas superiores de los lagos. Este método de captación es eficiente para garantizar un flujo constante de agua, aunque su efectividad depende de la cantidad de agua disponible en la fuente (Stauffer y Spuhler, 2020) (Figura 3).

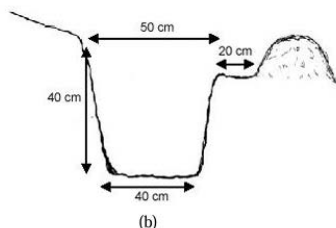
Figura 3. Captación de río subterráneo



4. Zanjas de infiltración

Las zanjas de infiltración son excavaciones que se realizan en el terreno en forma de canales de sección rectangular o trapezoidal, que se construyen a curvas de nivel para detener la escorrentía de las lluvias y almacenar agua para los pastos y cultivos instalados debajo de las zanjas (figura 4). Una función que cumple esta práctica es de acortar la longitud de la pendiente, disminuyendo de esta manera los riesgos de grandes escorrentías, que causan erosión, y que se producen en las laderas durante la época de lluvias. Otra, función, importante es detener o depositar el agua de escorrentía de las laderas favoreciendo su infiltración en el terreno para mantener la humedad en beneficio de pastos y plantaciones forestales (Ministerio de Agricultura y Riego, 2014).

Figura 4. Dimensiones de las zanjas y el resultado de su implementación



Nanotecnologías potenciales a la aplicación de recolección de agua

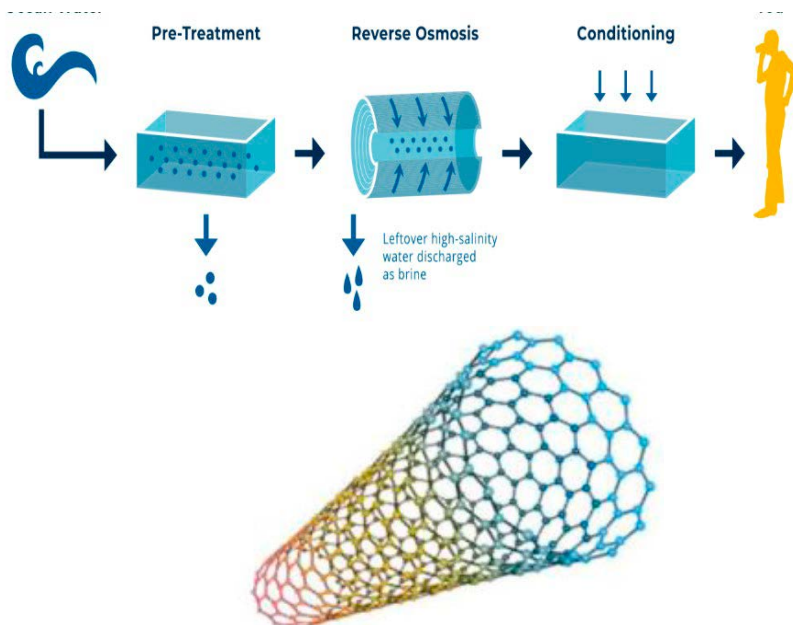
1. Desalinización de agua de mar

La nanotecnología se utiliza principalmente en el monitoreo, la desalinización, la purificación y el tratamiento de aguas residuales, ofreciendo soluciones innovadoras para prevenir futuras escasez de agua. Una de las ventajas de esta tecnología es la posibilidad de modificar nanomateriales con grupos químicos específicos para aumentar su afinidad por determinadas sustancias. Debido a sus altas superficies y capacidades eléctricas y catalíticas, los nanomateriales pueden ser utilizados para crear catalizadores más eficientes en la purificación del agua (Huang et al., 2021).

Uno de los compuestos destacados en este ámbito son los nanotubos de carbono, que han demostrado ser altamente efectivos en la remoción de exceso de sal cuando se aplican en filtros. Los nanotubos de carbono consisten en láminas de carbono de un átomo de espesor, plegadas en largas nanoestructuras cilíndricas huecas con un diámetro de aproximadamente 1 nm y una longitud que puede alcanzar varios centímetros. Los átomos de carbono en estos nanotubos están fuertemente unidos, formando estructuras extremadamente resistentes (Yang et al., 2020). Además, los nanotubos de carbono poseen propiedades adsorbentes únicas que los hacen útiles en la desalinización y en numerosas aplicaciones de separación (Kim et al., 2020).

Mediante la carboxilación, (Bhadra et al. 2013) mejoraron la eficiencia de desalinización al funcionalizar los nanotubos de carbono e incorporarlos en una membrana inmovilizada. Esta modificación aumentó la polaridad de los nanotubos, lo que les permitió interactuar de manera más efectiva con el vapor de agua polar, reduciendo significativamente la entrada de líquido en los poros de la membrana durante el proceso de destilación. Como resultado, se logró una reducción de sal superior al 99 % en la destilación con membrana de gas de barrido utilizando nanotubos de carbono funcionalizados con carboxilo, superando consistentemente el rendimiento de las membranas tradicionales (Yang et al., 2020) (Figura 5).

Figura 5. Implementación de nanotubos de carbono con un 90 % en la reducción de sal más que en otras membranas que no contienen nanotubos de carbono



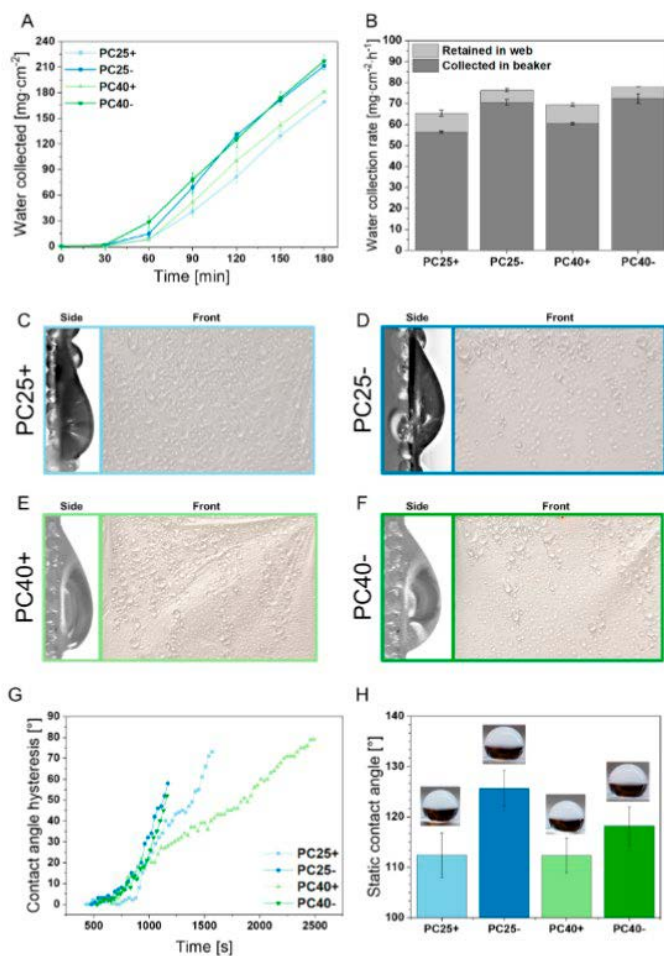
2. Recolección de agua atmosférica

En estudios recientes, se ha investigado la influencia de las propiedades superficiales de las fibras de policarbonato (PC) electrohiladas sobre la eficiencia en la recolección de agua. La química de la superficie y las propiedades mecánicas de las fibras de PC se controlaron ajustando la polaridad eléctrica y los niveles de humedad durante el proceso de electrohilado. Esto permitió la fabricación de mallas en un solo paso, optimizadas para aplicaciones de recolección de agua. Los resultados experimentales fueron confirmados mediante simulaciones numéricas que consideraron el efecto de la superficie sobre las gotas de agua (Yang et al., 2020).

Las fibras de PC electrohiladas demostraron una excelente estabilidad mecánica y propiedades hidrofóbicas, características deseables para mejorar la eficiencia de recolección de agua. La eficacia de las mallas electrohiladas depende del potencial de la superficie y la química superficial de las fibras, los cuales pueden ser optimizados ajustando la polaridad eléctrica y

la humedad relativa durante el proceso de electrohilado. Las mallas de PC producidas con polaridad eléctrica negativa y una humedad del 40 % mostraron una tasa de recolección de agua superior en comparación con otros colectores de niebla electrohilados, con una eficiencia que supera entre un 46 % y un 145 % bajo las mismas condiciones experimentales (Huang et al., 2021). Además, las fibras de PC con una mayor superficie tienen la capacidad de atraer gotas más pequeñas electrostáticamente, lo que ha sido confirmado por simulaciones numéricas. Una comprensión detallada de cómo interactúan el agua y las propiedades superficiales diseñadas de las fibras es crucial para desarrollar materiales capaces de abordar desafíos globales, como el acceso a agua limpia (Yang et al., 2020) (Figura 6).

Figura 6. Resultados de la recolección de agua para fibras de PC electrohiladas producidas con polaridad eléctrica positiva (PC+) y negativa (PC-): (A) Recolección de agua de niebla en una prueba de 3 h y (B) tasa de recolección de agua por hora. (C-F) Imágenes de gotas de agua depositadas en mallas de PC electrohiladas verticales antes de fluir hacia el vaso en la vista lateral y en la vista frontal; recolectaron gotas después de 90 minutos de agua de niebla en la superficie de la malla. (G) Gráfico que indica los cambios en la histéresis del ángulo de contacto en las mallas en el tiempo. (H) es una medición del ángulo de contacto estático con imágenes representativas de gotas de agua depositadas sobre las mallas colocadas horizontalmente

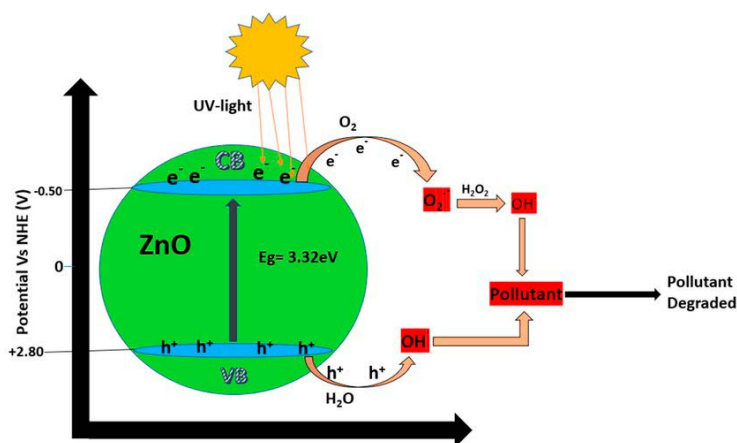


3. Eliminación de contaminantes presentes en el agua

La nanotecnología está emergiendo como una herramienta revolucionaria en el campo de la purificación y descontaminación del agua, abordando uno de los problemas más apremiantes del mundo: la escasez de agua limpia. Con el aumento de la demanda de agua potable y la contaminación de las fuentes hídricas, las tecnologías convencionales de tratamiento de agua a menudo resultan insuficientes o ineficaces. La nanotecnología, que implica la manipulación de materiales a una escala nanométrica, ofrece nuevas soluciones más eficientes y sostenibles. Entre estas soluciones se encuentran los nanocompuestos, cuyos efectos son significativamente amplificados a escala nanométrica. Estos nanocompuestos pueden ser útiles para eliminar patógenos y bacterias perjudiciales para la salud humana, y también son eficaces en la degradación y adsorción de colorantes utilizados por la industria textil, los cuales contaminan grandes cantidades de agua (Honorio et al., 2019).

Un estudio relevante realizado por Sanad et al. (2022) sintetizó nanocompuestos de ZnO, ZnS y ZnO-ZnS mediante el método sol-gel y evaluó su eficacia en la degradación de colorantes como el azul de metileno y la eosina. Utilizaron agentes captadores de electrones (AgNO_3), huecos (KI), radicales hidroxilo (isopropanol) y superóxidos (benzoquinona) bajo luz ultravioleta para evaluar la degradación. Los resultados indicaron que la incorporación de ZnO en la superficie de ZnS inducía la estabilización de las partículas de óxido, lo que reducía la tasa de recombinación del par electrón-hueco y permitía la destrucción completa de los contaminantes orgánicos. No obstante, los radicales hidroxilo y los agujeros desempeñaron un papel predominante en la degradación de los tintes (Huang et al., 2021; Kim et al., 2020) (Figura 7).

Figura 7. En la imagen se puede observar cómo funciona un catalizador hecho de óxido de zinc, el cual, al entrar en contacto con el contaminante, lo degrada en gran medida con la ayuda de la incidencia de los rayos UV, logrando una fotocatalisis



4. Impacto ambiental

La aplicación de la nanotecnología en la recolección y purificación de agua ha suscitado un creciente interés debido a su potencial para mejorar la eficiencia y efectividad de estos procesos. Los nanocompuestos y las tecnologías basadas en nanomateriales ofrecen soluciones avanzadas para la eliminación de contaminantes y patógenos del agua, mejorando significativamente los métodos convencionales de tratamiento de agua (Yang et al., 2020; Huang et al., 2021). Sin embargo, como ocurre con cualquier tecnología emergente, es esencial evaluar su impacto ambiental para garantizar que sus beneficios superen cualquier posible efecto adverso.

La nanotecnología puede presentar riesgos para la salud humana, ya que ciertos nanomateriales pueden ser invisibles al ojo humano y solo detectables mediante instrumentos especializados. Además, es fundamental realizar simulaciones para evaluar los efectos a largo plazo de estas técnicas y metodologías en el medioambiente y en la salud pública (Kim et al., 2020; Sanad et al., 2022). A continuación, se presentarán tanto los beneficios como las desventajas de implementar estas tecnologías avanzadas para su potencial uso en la recolección y purificación del agua.

Beneficios ambientales

1. Eficiencia energética

Las membranas de nanofiltración y ósmosis inversa fabricadas con nanomateriales, como nanotubos de carbono y grafeno, ofrecen una mayor permeabilidad al agua con menor presión. Esta característica se traduce en una menor energía requerida para bombear el agua a través de las membranas, lo que a su vez contribuye a la reducción de la huella de carbono asociada con la purificación del agua (Huang et al., 2021; Kim et al., 2020). Los nanotubos de carbono, por ejemplo, son conocidos por su alta eficiencia en la filtración debido a su estructura única y su capacidad para absorber contaminantes y mejorar la pureza del agua (Sanad et al., 2022). Esta mejora en la eficiencia energética de los sistemas de filtración no solo optimiza el proceso de purificación, sino que también promueve una solución más sostenible y ecológica para el tratamiento del agua.

2. Reducción de químicos y residuos

Las propiedades únicas de los nanomateriales, como su alta superficie específica y reactividad, permiten la eliminación de contaminantes con una menor cantidad de productos químicos. Por ejemplo, las nanopartículas de plata son reconocidas por sus propiedades antibacterianas, que permiten la desinfección del agua sin necesidad de cloro u otros desinfectantes químicos. Esta capacidad reduce la generación de subproductos tóxicos y residuos químicos, minimizando el impacto ambiental asociado con los métodos tradicionales de purificación del agua (Kim et al., 2020; Yang et al., 2020). La alta superficie específica de los nanomateriales mejora su capacidad para interactuar con contaminantes, haciendo los procesos de tratamiento más eficientes y sostenibles.

3. Regeneración y reutilización

Muchos nanoadsorbentes y membranas de nanofiltración pueden ser regenerados y reutilizados varias veces antes de ser reemplazados, lo que reduce la cantidad de desechos sólidos generados. Esta capacidad de rege-

neración no solo prolonga la vida útil de los materiales, sino que también contribuye a un menor impacto ambiental en comparación con las tecnologías tradicionales que requieren el reemplazo frecuente de materiales filtrantes (Xu et al., 2020; Huang et al., 2021). La reutilización eficiente de estos nanomateriales ayuda a minimizar la generación de residuos y promueve prácticas más sostenibles en el tratamiento del agua.

Posibles impactos negativos

1. Liberación de nanopartículas

Uno de los principales riesgos ambientales asociados con la nanotecnología es la liberación de nanopartículas en el medioambiente. Durante la fabricación, uso y disposición de nanomateriales, existe la posibilidad de que estas partículas se liberen en el agua, el suelo y el aire. Las nanopartículas pueden tener efectos tóxicos en organismos acuáticos y terrestres, y su comportamiento y destino en el medioambiente aún no se comprenden completamente (Sanad et al., 2022; Yang et al., 2020). La falta de comprensión completa sobre los efectos ambientales de estas partículas plantea desafíos para la gestión segura de la nanotecnología y requiere una investigación continua para evaluar y mitigar sus posibles impactos adversos.

2. Producción de nanomateriales

La fabricación de nanomateriales a menudo requiere el uso de procesos químicos y físicos intensivos, que pueden tener impactos ambientales significativos. La extracción de materias primas, el consumo de energía y la generación de residuos durante la producción de nanomateriales son aspectos críticos que deben ser considerados (Huang et al., 2021; Xu et al., 2020). Es fundamental desarrollar métodos de producción más sostenibles y eficientes para minimizar estos impactos y garantizar que los beneficios de la nanotecnología en la purificación del agua no se vean eclipsados por los efectos ambientales adversos asociados con su producción.

3. Gestión de residuos

Al final de su vida útil, los materiales basados en nanotecnología deben ser gestionados adecuadamente para evitar la liberación de nanopartículas en el medioambiente. Esto implica desarrollar estrategias de reciclaje y disposición seguras para los nanomateriales, lo cual puede ser un desafío debido a su tamaño y propiedades únicas (Sanad et al., 2022; Yang et al., 2020). La implementación de métodos adecuados para la gestión de residuos es crucial para minimizar los riesgos ambientales asociados con los nanomateriales y garantizar que su impacto en el medioambiente sea lo menos perjudicial posible.

Los hallazgos identificaron que los nanomateriales como el óxido de titanio (TiO_2), óxido de zinc (ZnO) y membranas de grafeno presentan alta eficacia en la remoción de contaminantes y microorganismos presentes en el agua. Además, tecnologías como el uso de nanofiltros, membranas híbridas y recubrimientos superhidrofóbicos se han implementado exitosamente en contextos con escasez hídrica.

Además, se identificaron estudios que destacan la posibilidad de adaptar estas tecnologías a sistemas descentralizados de bajo costo, lo que permitiría su aplicación en comunidades rurales sin acceso a redes de agua convencionales. Investigaciones en India y África han mostrado que sistemas de filtración con nanomateriales pueden reducir hasta en un 70 % la incidencia de enfermedades hídricas en zonas marginadas, con una vida útil extendida de los materiales. Esto representa una ventaja significativa frente a tecnologías tradicionales que requieren un reemplazo frecuente. Ver tabla 1, donde se muestra una síntesis de estudios recientes sobre nanotecnología aplicada al tratamiento de agua potable.

Tabla 3. *Aplicaciones de nanotecnología en tratamiento de agua potable*

Tecnología	Nanomaterial utilizado	Efectividad (%)	Fuente
Filtros de TiO_2	Dióxido de titanio	95 %	Kumar et al., 2021
Membranas de grafeno	Óxido de grafeno	98 %	Ali et al., 2023
Nanoesponjas	Sílice funcionalizada	92 %	Martínez et al., 2020

Discusión

Después de una revisión exhaustiva, se encontró que los avances tecnológicos en el campo de la nanotecnología ofrecen soluciones reales para enfrentar los retos asociados al acceso al agua potable. Estas innovaciones no solo mejoran la eficiencia del tratamiento de agua, sino que pueden ser adaptadas a sistemas de bajo costo para zonas rurales.

Es importante señalar que la eficiencia observada en los materiales desarrollados no es solo atribuible a su estructura a nanoescala, sino también a su capacidad de interacción química con una variedad de contaminantes. Esto permite tratar una mayor diversidad de fuentes de agua (dulce, salobre y residual) dentro del mismo sistema, lo cual es particularmente útil en contextos de escasez hídrica. Asimismo, la versatilidad de las tecnologías basadas en nanotecnología permite una integración flexible con métodos tradicionales como la captación de agua de lluvia o el tratamiento de aguas grises, promoviendo esquemas híbridos de tratamiento.

Conclusión

La recolección de agua con nanotecnología aplicada ofrece un potencial significativo para abordar la crisis hídrica mundial y mejorar el acceso al agua potable en todo el mundo. Sin embargo, se requiere un enfoque integral y colaborativo que aborde los desafíos técnicos, económicos, sociales y ambientales asociados con estas tecnologías (Ura et al., 2021; Kim et al., 2020). Al invertir en investigación y desarrollo, promover la innovación y la colaboración internacional, podemos avanzar hacia un futuro donde el agua sea accesible y segura para todos.

Este artículo proporciona una visión general de la recolección de agua con nanotecnología aplicada, destacando los avances recientes, los principios subyacentes, los desafíos y las perspectivas futuras. A medida que continuamos explorando nuevas fronteras en este campo, podemos aprovechar el poder de la nanotecnología para transformar nuestra relación con el agua y garantizar un futuro sostenible para las generaciones futuras. Sin embargo, es crucial abordar los posibles impactos negativos en el ambiente, como la liberación de nanopartículas y los desafíos asociados con

la producción y disposición de nanomateriales (Sanad et al., 2022; Yang et al., 2020). Un enfoque equilibrado y sostenible, que incluya la investigación continua y el desarrollo de mejores prácticas, es esencial para maximizar los beneficios y minimizar los riesgos ambientales de esta prometedora tecnología. Dado que, como toda tecnología emergente, aún no se comprende completamente su impacto en el medioambiente y la salud humana con uso a largo plazo debido a su implementación a escala limitada, es necesario realizar estudios adicionales para respaldar su implementación segura y efectiva.

Referencias

- Aguas Residuales.info. (2018, septiembre 3). Sistemas de recolección de agua atmosférica para captar el agua del aire. Aguas Residuales.info.
- Al-Gashgari, B., Almulhim, F., Sanchez-Huerta, C., & Hong, P. Y. (2024). Towards SDG 6: Wastewater treatment generates a precious water resource. *Frontiers for Young Minds*, 12, 1418929. <https://kids.frontiersin.org/articles/10.3389/frym.2024.1418929/full>
- Ali, M., Zhao, Y., & Wang, X. (2023). Graphene-based membranes for water purification: A review of recent progress and prospects. *Journal of Environmental Management*, 327, 116895. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.116895>
- Berger, M. (2023, noviembre 23). *La nueva nanotecnología facilita mucho la recolección de agua del aire*. Nanowerk. Recuperado de <https://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=64101.php>
- Evaristo, J., Jameel, Y., Tortajada, C., Wang, R. Y., Horne, J., Neukrug, H., ... & Biswas, A. (2023). Water woes: The institutional challenges in achieving SDG 6. *Sustainable Earth Reviews*, 5(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s42055-023-00067-2>
- Gonçalves, G. A. B., & Marques, P. (Eds.). (2019). Nanostructured Materials for Treating Aquatic Pollution. *Springer International Publishing*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-33745-2>
- Honorio, L. M. C., Trigueiro, P. A., Viana, B. C., Ribeiro, A. B., & Osajima, J. A. (2019). Nanostructured materials for the photocatalytic degradation of organic pollutants in water. In G. A. B. Gonçalves & P. Marques

- (Eds.), *Nanostructured Materials for Treating Aquatic Pollution* (pp. 65–90). *Springer International Publishing*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33745-2_3
- Huang, Y., Wang, C., Shao, C., Wang, B., Chen, N., Jin, H., Cheng, H., & Qu, L. (2021). Graphene oxide assemblies for sustainable clean-water harvesting and green-electricity generation. *Accounts of Materials Research*, 2(2), 97–107. <https://doi.org/10.1021/accountsmr.0c00073>
- Ismail, A. F., & Matsuura, T. (2022). Nanofiltration. In *Membrane Separation Processes* (pp. 61–68). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819626-7.00008-9>
- Kim, S., Kim, K., Jun, G., & Hwang, W. (2020). Wood-nanotechnology-based membrane for the efficient purification of oil-in-water emulsions. *ACS Nano*, 14(12), 17233–17240. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c07206>
- Kumar, R., Singh, A., & Sharma, M. (2021). Nanotechnology in water treatment: Applications and emerging trends. *Water Research*, 198, 117123. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117123>
- Martínez, L., Gómez, F., & Ortega, R. (2020). Desarrollo de nanoesponjas para la eliminación de contaminantes orgánicos en aguas residuales. *Revista de Tecnología Ambiental*, 15(3), 45–53.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2014, agosto). *Zanjas de infiltración*. Senamhi. Recuperado de <chrome-extension://efaidnbmnnnnibpcajpc-glclefndmkaj/https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/ais-2015/zanjas-infiltracion.pdf>
- Patel, N., & Joshi, U. (2022). Papel de la nanotecnología en la desalinización del agua de mar. *Specialusis Ugdymas*. Recuperado de <http://sumc.lt/index.php/se/article/view/1202/928>
- RS Ingeniería. (2023, septiembre 22). *Perforación de pozos de agua: Ventajas y desventajas*. RS Ingeniería.
- Stauffer, B., & Spuhler, D. (2020). *Captación de ríos, lagos y embalses (reservorios)*. *SSWM*. Obtenido de <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologiasde/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/captacion/captaci%C3%B3n-de%C3%ADos%2C-lagos-y-embalses-%28reservorios%29>
- Tecnotri. (2015, mayo 12). *Tanque modular vertical: Ideal para espacios pequeños*. Rototech Group.

- Ura, D. P., Knapczyk-Korczak, J., Szewczyk, P. K., Sroczyk, E. A., Busolo, T., Marzec, M. M., Bernasik, A., Kar-Narayan, S., & Stachewicz, U. (2021). Surface potential driven water harvesting from fog. *ACS Nano*, 15(5), 8848–8859. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c01437>
- Xu, J., Zhang, J., Fu, B., Song, C., Shang, W., Tao, P., & Deng, T. (2020). All-day freshwater harvesting through combined solar-driven interfacial desalination and passive radiative cooling. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(42), 47612–47622. <https://doi.org/10.1021/acsaami.0c14773>
- Yang, K., Pan, T., Pinnau, I., Shi, Z., & Han, Y. (2020). Simultaneous generation of atmospheric water and electricity using a hygroscopic aerogel with fast sorption kinetics. *Nano Energy*, 78, 105326. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105326>