

## Columnas Celulares Bioinspiradas con Gradiente de Porosidad y Actividad Fotocatalítica para Limpieza del Agua: Una Revisión Divulgativa

Juventino López Barroso <sup>1,\*</sup>, Eduardo Enrique Pérez Ramírez <sup>1</sup>, Cynthia Graciela Flores Hernández <sup>2</sup>, Maylu Guadalupe Romero Sánchez <sup>1</sup> y Gabriela Pineda-Chacón <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Metalmecánica, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Querétaro, Querétaro, Querétaro, México

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias Básicas, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Querétaro, Querétaro, Querétaro, México

\* Autor de correspondencia: [juventino.lb@queretaro.tecnm.mx](mailto:juventino.lb@queretaro.tecnm.mx)

### Artículo de divulgación científica

Recibido: 21 de julio de 2026

Aceptado: 15 de septiembre de 2026

Publicado: 11 de octubre de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.734>

**Resumen:** La escasez de agua para consumo humano y la inadecuada gestión de aguas residuales se han intensificado a niveles críticos a nivel mundial. De acuerdo con el Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP), para el 2050 la demanda para consumo humano podría ser hasta 30% mayor en comparación de la actual. Así también, UNEP señala que, a nivel mundial, más del 80 % de las aguas residuales generadas por la sociedad sean vertidas al medio ambiente sin tratar (United Nations Environment Programme, 2018). Entre estas aguas residuales pueden encontrarse colorantes, fármacos, pesticidas y otros contaminantes orgánicos, que pueden permanecer en ríos, lagos y efluentes aún después de tratamientos convencionales. En este sentido, el desarrollo de métodos novedosos de manufactura, la nanotecnología y la biomimética, convergen para explorar tecnologías de remediación hídrica adaptables y eficientes. El objetivo de esta revisión es analizar el potencial de los dispositivos para la remoción de contaminantes en agua con columnas celulares bioinspiradas. La manufactura aditiva proporciona una plataforma de fabricación capaz de obtener formas complejas, por ejemplo, estructuras celulares con gradientes de tamaño, ideales para la creación de columnas con diseños bioinspirados. En el caso de la nanotecnología, partículas como el dióxido de titanio aportan actividad fotocatalítica a estas estructuras. La biomimética aporta el diseño desde la inspiración de la naturaleza, donde se pueden encontrar mecanismos que, adaptados al entorno, resultan en soluciones a problemas de ingeniería. De esta manera, la integración de estas tres áreas del conocimiento resulta en soluciones como filtros para remoción de contaminantes. En estos sistemas, el diseño bioinspirado modifica la distribución del flujo, el tiempo de residencia y la interacción del contaminante con la superficie fotocatalítica.

**Palabras clave:** biomimética, columnas celulares, fotocatalisis, contaminantes orgánicos, manufactura aditiva

### Introducción

El agua, líquido vital para la vida en nuestro planeta, sostiene la salud, la producción de alimentos, el balance en los ecosistemas, así como la actividad industrial. Sin embargo, la descarga de contaminantes provenientes de uso urbano, hospitales, actividad agrícola e industrial y algunas otras actividades, impacta negativamente en los cuerpos de agua (UN Habitat and WHO, 2021). La lista de contaminantes es amplia, dentro de esta se encuentran a los compuestos orgánicos persistentes, los fármacos, los antibióticos y los pesticidas. Estos contaminantes aun en bajas concentraciones, pueden causar un daño catastrófico a los organismos acuáticos y al ser humano (SEMARNAT, 2018; UN Habitat and WHO, 2021).

Para enfrentar este problema, adicionalmente a las tecnologías convencionales de tratamiento se han desarrollado sistemas novedosos de tratamientos de aguas. La finalidad de estos sistemas yace en transformar los contaminantes en sustancias menos dañinas mediante procesos avanzados de oxidación (Kaur *et al.*, 2025). En la actualidad algunos de estos sistemas utilizan columnas celulares gradientes fabricadas mediante manufactura aditiva o impresión 3D (Jyoti *et al.*, 2026; Kaur *et al.*, 2025). Una columna celular (Figura 1a) es una estructura con poros cuya forma se repite en todo su volumen, como los huesos o los panales de las abejas (Figura 1b). En el caso de una columna celular con gradiente, el tamaño, la densidad o espesor de pared de la celda cambian gradualmente a lo largo de su volumen (Figura 1c). Estas transiciones se observan en estructuras naturales, por ejemplo, en el hueso, el cual cambia de tamaño de poro de la zona más externa (córtex) hacia el interior (hueso esponjoso) (Zendeli *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023; X. Zhao *et al.*, 2026). La idea de estos sistemas consiste en aprovechar la libertad geométrica de la manufactura aditiva (Figura 1d) para construir estructuras porosas o con geometrías intrincadas (complejas), que funcionen como soportes de otros materiales que favorezcan la degradación, como el dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>), y así degradar contaminantes (Jyoti *et al.*, 2026).

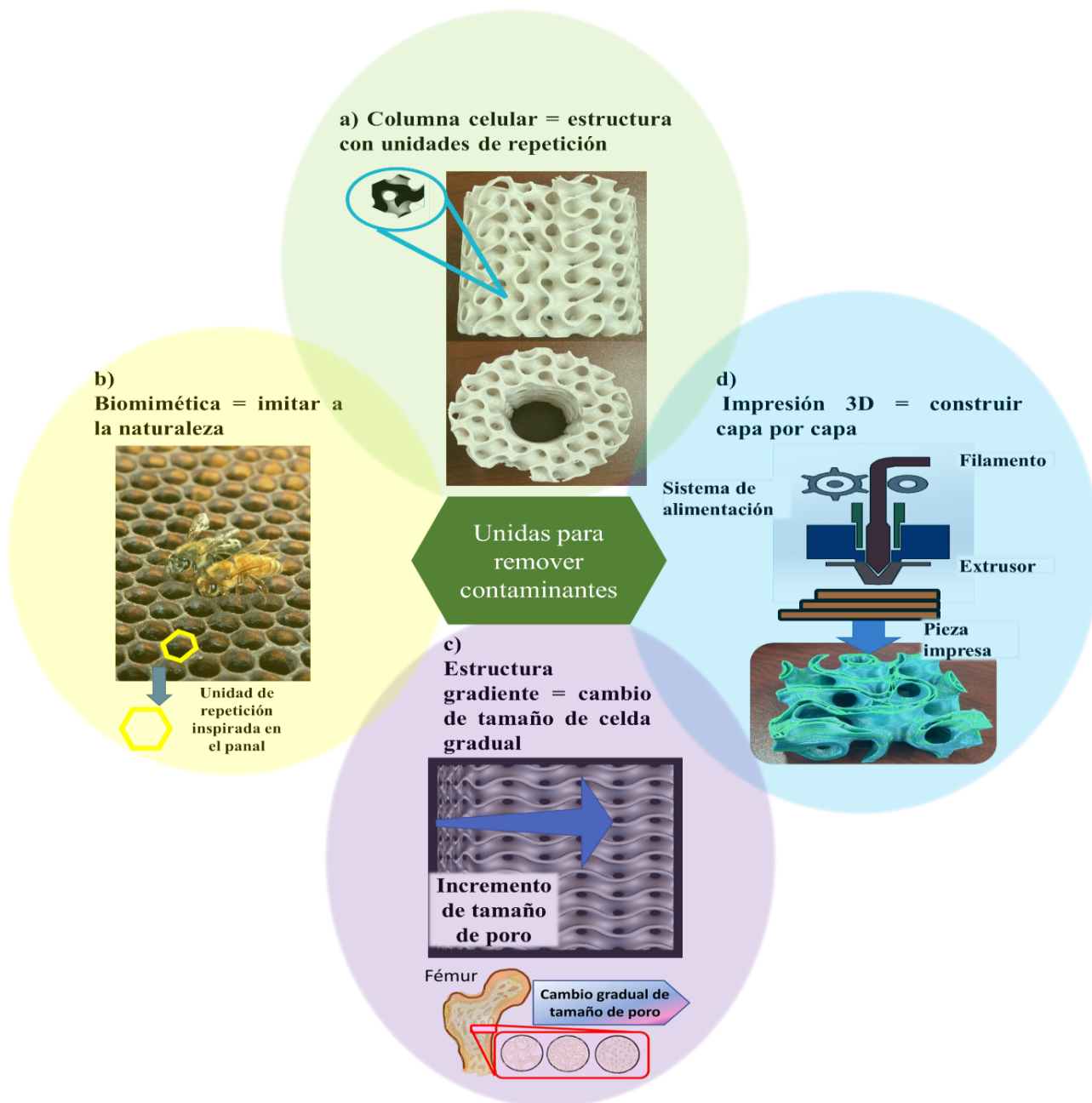


Figura 1. (a) Vista lateral y superior de columna celular; (b) bioinspiración de unidades de repetición a partir de los hexágonos del panel de abejas; (c) ejemplos de gradiente de tamaño, de izquierda a derecha la unidad de repetición cambia su tamaño gradualmente; (d) diagrama esquemático de la impresión 3D y ejemplo de pieza impresa. Fotografía del panel: Beaufort (s.f.)

Este enfoque aborda dos problemas de manera simultánea. Por un lado, la eficiencia química del tratamiento de aguas mediante partículas para degradar moléculas contaminantes. En lugar del análisis aislado del material fotocatalítico en forma de polvo en una solución acuosa, se puede incorporar en una columna como un filtro (Figura 2). De esta manera, conceptos como porosidad, área superficial, cinética de degradación y estabilidad mecánica se conectan en una sola estructura (Jyoti *et al.*, 2026). Por otro, la necesidad de diseñar dispositivos accesibles de fabricar, con alta reproducibilidad y que puedan adaptarse en diferentes tamaños. En este sentido la manufactura aditiva brinda la oportunidad de modificar rápidamente el diseño de alguna columna (prototipado rápido) y comparar varias arquitecturas sin necesidad de moldes complejos con la ventaja de un bajo desperdicio de material (Mpongwana & Rathilal, 2022).

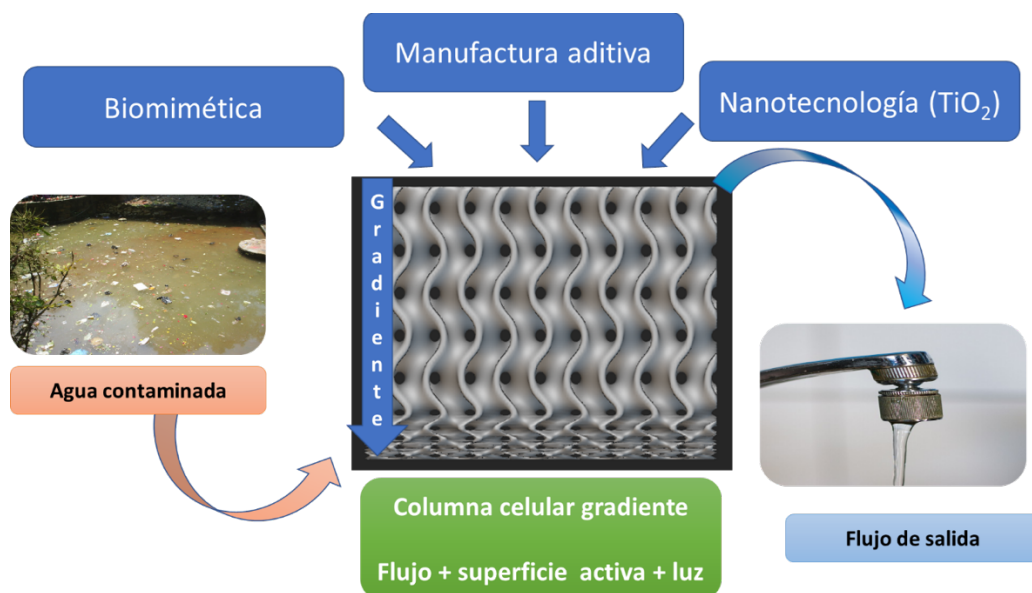


Figura 2. Diagrama esquemático de la columna celular gradiente como plataforma integral de la biomimética, manufactura aditiva y la nanotecnología (Raut, 2007; Hoang, 2016; Raut, 2007).

### *El desafío de degradar contaminantes persistentes en el agua*

Los contaminantes del agua tienen características que los hacen comportarse de manera muy diferente, por ejemplo, algunos sólidos pueden separarse por filtración o sedimentación. Sin embargo, existen compuestos orgánicos que requieren tratamientos más especializados. Entre ellos se encuentran colorantes utilizados en procesos industriales, fármacos residuales, pesticidas y contaminantes emergentes que resisten la degradación natural (Kaur *et al.*, 2025; SEMARNAT, 2018).

Una de las grandes problemáticas encontradas con los organismos acuáticos debido a estos contaminantes son la toxicidad acumulativa, alteraciones fisiológicas y cambios en la calidad del hábitat. Aunado a esto, la resistencia a la degradación de los contaminantes orgánicos puede generar una interacción con el medio ambiente prolongada. Por lo tanto, la remediación hídrica de estos necesita soluciones donde no solamente exista retención de contaminantes, sino que haya una contribución para degradarlos. Por ejemplo, con la fotocatalisis, que en síntesis es una tecnología en la que algunos materiales se activan con luz y generan especies altamente reactivas capaces de romper moléculas contaminantes (Kaur *et al.*, 2025; Swamy *et al.*, 2026).

Otro desafío consiste en que contaminantes orgánicos se encuentran mezclados con otras sustancias y que tienen condiciones variables de pH, temperatura, turbidez y presencia de sales. Por lo tanto, la complejidad de las aguas residuales incide negativamente en el desempeño de un tratamiento que en condiciones ideales funciona de manera eficaz. Por estas razones, los dispositivos de remediación no solo deben evaluarse en la remoción de un compuesto modelo, sino en su estabilidad, facilidad de recuperación, reutilización y compatibilidad con aguas residuales reales. Además, algunos métodos de tratamiento transfieren el contaminante a otra fase sin destruirlo. Por ejemplo, un material adsorbente puede capturar una molécula contaminante, pero después debe regenerarse o disponerse de manera segura. La fotocatalisis ofrece una ventaja conceptual: si el proceso se controla adecuadamente, puede transformar compuestos orgánicos en moléculas más simples y menos peligrosas. Para materializar esto el fotocatalizador necesita estar fijo, activo y accesible al flujo del agua (Jyoti *et al.*, 2026; Kaur *et al.*, 2025).

### *Columnas celulares gradientes*

Una columna celular gradiente es una estructura tridimensional con canales, poros o celdas internas cuyo tamaño y distribución cambian de manera gradual o controlada en su volumen (Figura 3). En este contexto, una celda, también conocida como célula, se entiende como la unidad geométrica repetitiva que, al organizarse en conjunto con otras unidades similares, forma la arquitectura interna de la columna y define propiedades como la porosidad, la

conectividad y la trayectoria del flujo (Figura 3). De esta manera, a diferencia de un filtro convencional, la arquitectura dirige el flujo del agua para incrementar el contacto con superficies activas como fotocatalizadores. La posibilidad de modificar la geometría y la porosidad permite considerar la arquitectura de la columna como una variable de diseño. Así, el tamaño de celda, la conectividad, distribución de los poros y las condiciones de flujo, pueden afectar el área y tiempo de contacto entre el contaminante y la superficie activa (Kaur *et al.*, 2025; Zhou & Ding, 2025). Por ello, una distribución gradiente del tamaño de celda puede plantearse como una estrategia de diseño para buscar un equilibrio entre circulación del fluido, resistencia al flujo y área de contacto.

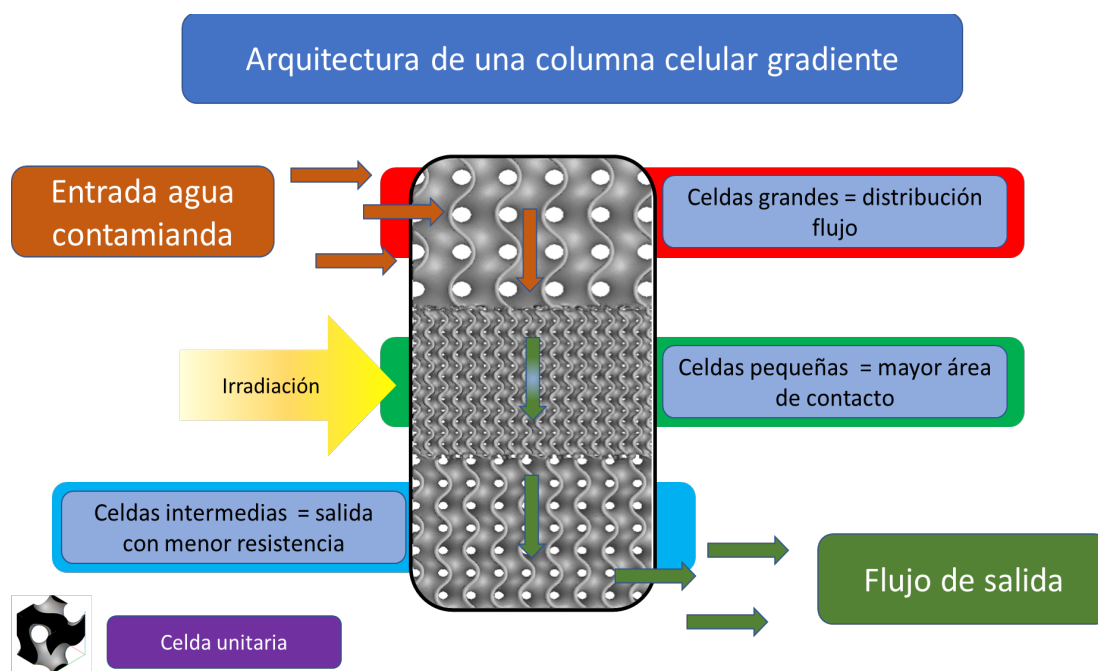


Figura 3. Arquitectura celular gradiente con tres secciones de tamaño.

Estas columnas pueden fabricarse mediante una técnica de manufactura aditiva llamada depósito de material fundido (FDM por sus siglas en inglés). Esta tecnología permite producir geometrías complejas a partir de un modelo hecho en un software de diseño asistido por computadora. Este modelo se replica tridimensionalmente mediante el depósito de capas superpuestas de polímero fundido. Por lo que es posible crear estructuras que pueden cambiar parámetros como el tamaño y el espesor de pared de las celdas, el gradiente de porosidad y el relleno de la estructura (Jyoti *et al.*, 2026). En este contexto, el gradiente nos indica que la celda de la columna cambia de tamaño de manera progresiva y con ello se busca equilibrar tres aspectos: el del flujo del agua, el área superficial y la estabilidad mecánica. La primera es que el agua entre y circule en el dispositivo, la segunda necesidad incorpora que el área superficial permite una interacción entre el material activo y los contaminantes, y la tercera es la estabilidad mecánica para tener estructuras reutilizables y de fácil manipulación.

Es importante analizar que, en una columna con celdas grandes, el agua atravesaría el dispositivo con rapidez, al mismo tiempo que el tiempo de contacto con las superficies activas disminuye. Si en cambio son extremadamente estrechas, el contacto aumentaría, sin embargo, el riesgo de resistencia al flujo y la obstrucción aumenta. Por lo tanto, el gradiente permite explorar puntos intermedios: zonas de entrada que faciliten la distribución del fluido, regiones internas que incrementen el tiempo de contacto y zonas de salida que reduzcan pérdidas de presión.

Adicionalmente, la geometría también juega un papel importante cuando existe la interacción con alguna fuente de luz como en el caso de los fotocatalizadores. Una estructura con celdas muy cerradas limita la irradiación de superficies internas, mientras que una arquitectura interconectada favorece la activación de más zonas. Por esta razón es necesario considerar en el diseño de manera simultánea flujo, iluminación, resistencia mecánica y parámetros de impresión. Esta visión convierte a la columna en un dispositivo funcional, más que un soporte físico de partículas (Jyoti *et al.*, 2026; Zhou & Ding, 2025).

## Bioinspiración

La naturaleza ofrece soluciones extremadamente eficientes para mover, filtrar y distribuir fluidos. Los tejidos vasculares de las plantas, los corales, los huesos esponjosos y algunos organismos filtradores muestran arquitecturas jerárquicas donde los canales y poros se organizan en varias escalas (Figura 4) (Zhou & Ding, 2025). La biomimética toma esos principios y los traduce a soluciones de ingeniería. Es necesario mencionar que no solo se trata de copiar formas biológicas, sino es necesario adoptar ideas y mecanismos funcionales. Por ejemplo, las redes vasculares de las plantas aportan principios de ramificación y distribución eficiente del flujo; el hueso cortical y trabecular muestra una transición gradual de porosidad con una combinación excepcional de resistencia y ligereza, mientras que estructuras como los corales ejemplifican una estructura de alta conectividad y área superficial (Du Plessis & Broeckhoven, 2022; Zhou & Ding, 2025).

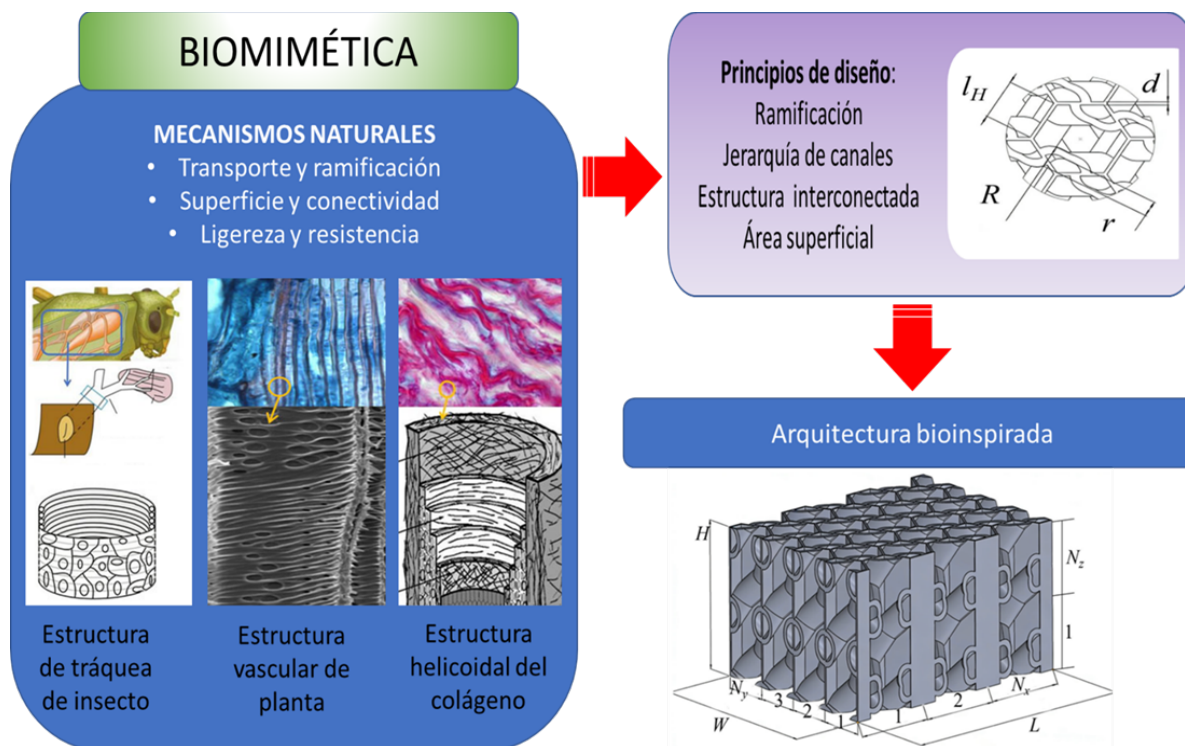


Figura 4. Traducción de principios bioinspirados a estructuras ingenieriles. Adaptado de Nian *et al.* (2026).

La combinación de la manufactura aditiva y la biomimética permite que el diseño en las columnas sea una parte activa del tratamiento hídrico (Du Plessis & Broeckhoven, 2022). La geometría de la columna influye en el desplazamiento del agua, el tiempo de permanencia en el dispositivo y la interacción contaminantes-superficies activas (Du Plessis & Broeckhoven, 2022; Zhou & Ding, 2025). En los sistemas biológicos encontramos ejemplos de multifuncionalidad, por ejemplo, un tallo vegetal debe no solo transportar y distribuir nutrientes y agua, sino también debe cumplir con la resistencia mecánica para mantener la estructura. De manera análoga, las columnas celulares para remediación hídrica deben conducir el fluido, ser resistentes a la manipulación, y optimizar la superficie activa para evitar estancamientos o baja interacción con los contaminantes. La bioinspiración ayuda a pensar en arquitecturas integradas, no en piezas diseñadas a partir de una sola función.

Otro principio útil en la naturaleza y de gran utilidad en aplicaciones ingenieriles es la jerarquía estructural. En sistemas biológicos, conductos grandes se encargan de distribuir el flujo de algún fluido, mientras que los canales de menor tamaño se enfocan en el intercambio con superficies internas (Du Plessis & Broeckhoven, 2022). Con la manufactura aditiva se podrían replicar estos mecanismos desde la creación de columnas con celdas de diferente tamaño, redes ramificadas o patrones con cambios graduales en alguna dirección de interés. No se trata de solo imitar formas naturales sino llevar a cabo un aprendizaje en conjunto a partir del mecanismo de transporte, la resistencia y el contacto fluido-superficie activa (Du Plessis & Broeckhoven, 2022; Zhou & Ding, 2025). De esta manera la biomimética se convierte en un puente entre el análisis de sistemas naturales y el diseño de tecnologías ambientales.

## Fotocatálisis

La fotocatalisis heterogénea es un proceso de oxidación avanzada que surge como una alternativa adecuada para la eliminación de los contaminantes del agua. En este proceso, se emplea luz visible y/o luz ultravioleta como fuente de energía para activar un sólido semiconductor, llamado fotocatalizador. Un semiconductor es un material que posee un espacio vacío entre sus bandas de valencia y conducción, el cual es llamado banda prohibida o banda gap. De forma global, se puede decir que la fotocatalisis emplea la energía que tiene la luz para activar materiales que son capaces de eliminar ciertas sustancias, como los contaminantes que existen en el agua o en el aire.

Para que se lleve a cabo el proceso de activación del fotocatalizador, éste debe ser irradiado con energía ( $E = h\nu$ ) suficiente o mayor a la energía de su banda prohibida ( $E_g$ ), que regularmente se encuentra entre 0.5 y 4 electronvoltios, lo cual es propio de cada material semiconductor (Y. Zhao *et al.*, 2022). Esta absorción de energía por parte del fotocatalizador promueve electrones ( $e^-$ ) de su banda de valencia a su banda de conducción y deja huecos ( $h^+$ ) en la banda de valencia. Estas dos especies son las responsables de generar a su vez otras especies químicas muy reactivas llamadas radicales libres, por ejemplo, el radical hidroxilo ( $\cdot OH$ ) y el radical superóxido ( $O_2^{\cdot -}$ ), las cuales son las verdaderas responsables de la degradación de contaminantes (Mohamadpour & Amani, 2024). Para tener un contexto más claro de lo que pueden generar los radicales libres, estas especies químicas, en los seres humanos, pueden generar el envejecimiento de la piel.

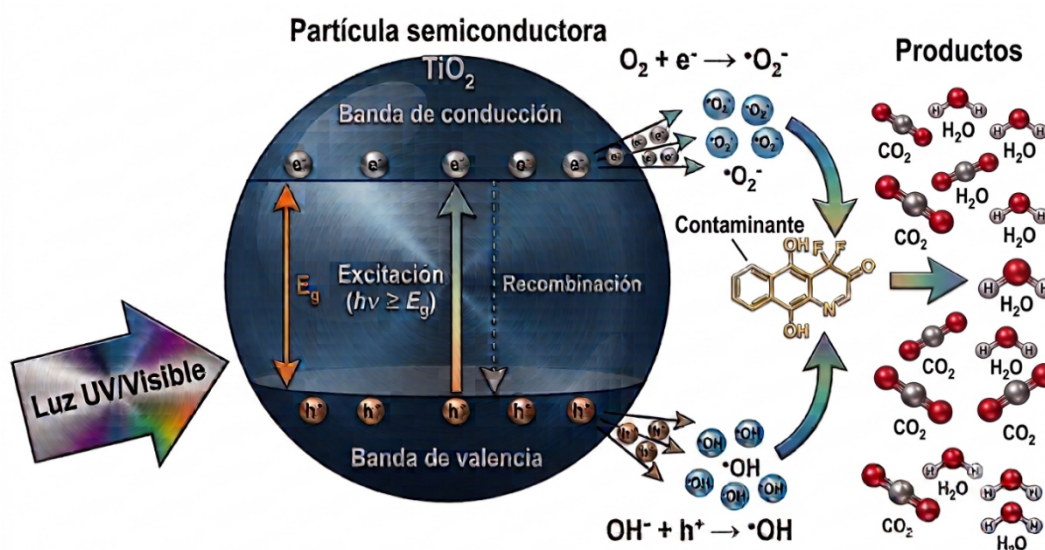


Figura 5. Esquema ilustrativo de un proceso de activación fotocatalítica y su empleo en la degradación de un contaminante orgánico. Imagen creada con Gemini (Google, 2026).

Para que el proceso fotocatalítico se lleve a cabo, los contaminantes a degradar, deben estar adsorbidos en la superficie del fotocatalizador al momento de activarlo, ya que el proceso de degradación se lleva a cabo en la superficie de éste. Los radicales libres tienen la capacidad de degradar los compuestos orgánicos como fármacos, colorantes u otros contaminantes emergentes a través del rompimiento de sus enlaces químicos (Paiu *et al.*, 2025). En el mejor de los casos, se puede lograr una mineralización completa, es decir, se transforman los compuestos orgánicos contaminantes en subproductos inofensivos como agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y sales minerales sencillas. En la Figura 5 se puede observar un esquema ilustrativo del proceso de activación fotocatalítica, así como la degradación del contaminante.

Uno de los materiales fotocatalíticos más importantes y eficientes en la degradación de contaminantes del agua es el dióxido de titanio, cuya fórmula química es  $TiO_2$  y tiene diferentes usos, por ejemplo, en pinturas, cosméticos, protectores solares, etc. Para su uso en fotocatalisis, regularmente ha sido empleado en polvo, pero para su uso a mayor escala es necesario integrarlo en soportes que faciliten su recuperación del agua una vez finalizado el proceso fotocatalítico y que permitan su reúso (Kaur *et al.*, 2025; Swamy *et al.*, 2026).

## Retos y perspectivas

El desarrollo de columnas celulares fotoactivas genera varias líneas de análisis. En primer lugar, la comparación sistemática de las geometrías bioinspiradas para identificar las que favorecen a un equilibrio en el flujo, área superficial, entrada de luz y resistencia mecánica. Es necesario en este sentido comparar los resultados de degradación de contaminantes cuando se modifican el tamaño de celda, la orientación de los canales, el porcentaje de porosidad o la distribución del gradiente (Jyoti *et al.*, 2026).

Otro reto es la aplicación de partículas como el  $\text{TiO}_2$ . Para esto, es necesario analizar tratamientos superficiales del polímero, las combinaciones con otros óxidos y desarrollar estrategias para que el recubrimiento a la columna polimérica sea más uniforme y pueda activarse con un espectro amplio de luz, de esta manera la luz natural podría aprovecharse para reducir el consumo energético (Swamy *et al.*, 2026). En otro aspecto, uno de los retos fundamentales será la transición de contaminantes modelo a mezclas más cercanas a efluentes reales. La coexistencia de colorantes, materia orgánica natural, sales, sólidos suspendidos y compuestos con diferentes velocidades de degradación en muestras ambientales desafía el diseño para estos escenarios reales (Kaur *et al.*, 2025; SEMARNAT, 2018; Zhou & Ding, 2025).

Finalmente, el escalamiento, la durabilidad y el análisis de ciclo de vida son criterios esenciales para valorar la aplicación de estas tecnologías. El eficiente funcionamiento en el laboratorio debe trasladarse hacia volúmenes y efluentes reales sin perder características como eficiencia, funcionalidad tras varios ciclos de uso, actividad fotocatalítica. Además de obtener un recubrimiento uniforme, la estabilidad y adherencia de las nanopartículas a la columna durante ciclos sucesivos de operación toman una relevancia especial, ya que es fundamental para conservar la actividad catalítica y evitar la liberación de partículas de  $\text{TiO}_2$  al agua. De esta manera, estos criterios serán la guía para convertir las columnas en módulos útiles para sistemas de tratamiento hídricos (Zhou & Ding, 2025).

## Conclusiones

El desarrollo de columnas para remediación hídrica muestra cómo la ingeniería puede aprender de la naturaleza para resolver problemas ambientales. Las formas con celdas y jerarquías en los sistemas biológicos inspiran columnas celulares capaces de conducir el agua, aumentar el área de contacto y favorecer la fotocatalisis. De esta manera, se abre la oportunidad para diseñar dispositivos capaces de responder a contaminantes más complejos. Las columnas celulares fabricables mediante manufactura aditiva y funcionalizables con  $\text{TiO}_2$  se perfilan, de acuerdo con la literatura analizada, como una ruta prometedora para integrar diseño estructural y actividad fotocatalítica en dispositivos de remediación hídrica. Sin embargo, su aplicación requiere todavía una validación experimental sistemática, pruebas en efluentes reales, estudios de reutilización y escalamiento. Por lo que es necesario un enfoque interdisciplinario para integrar la ingeniería en materiales, la química ambiental, el diseño mecánico y la fabricación por manufactura aditiva. De esta manera, su desempeño ligado con la arquitectura diseñada, material de fabricación e interacción con el agua busca la mayor eficiencia. Estas tecnologías se encuentran actualmente en un nivel inicial y enfrentan grandes retos, sin embargo, las estructuras bioinspiradas ofrecen una ruta prometedora hacia soluciones flexibles para la remediación hídrica.

**Agradecimientos y financiamiento:** Los autores agradecen al TECNM por el apoyo con el proyecto TECNM 24707.26-P.

**Declaración de uso de IA:** Los autores declaran el uso de Gemini (Google) como apoyo para la generación gráfica del esquema conceptual presentado en la Figura 5. Por lo que, al revisar y validar el contenido, asumen la responsabilidad sobre la información presentada.

## Bibliografía

- Beaufort, J. (s. f.). *Las abejas obreras en el panal* [Fotografía]. PublicDomainPictures.net. CC0/Public Domain. <https://www.publicdomainpictures.net/es/view-image.php?image=171929&picture=worker-bees-on-honeycomb>
- du Plessis, A., & Broeckhoven, C. (2022). Functional synergy of biomimicry and additive manufacturing: Toward a bio-enhanced engineering approach. En *Biomimicry for materials, design and habitats: Innovations and applications* (pp. 269–289). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821053-6.00013-8>

- Hoang, V. (2016). *Running tap* [Fotografía]. Wikimedia Commons. CC0 1.0 Universal. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tap-gb0fe5d2cc\\_1920.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tap-gb0fe5d2cc_1920.jpg)
- Jyoti, Mariani, M., Nanni, F., Mazzuca, C., & Bragaglia, M. (2026). Influence of infill geometry on the degradation performance of 3D printed TiO<sub>2</sub> photocatalytic filters. *Ceramics International*, 52(1), 722–734. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.11.372>
- Kaur, B., Singh, P., Thakur, S., Singh, A., Chaudhary, V., Kumar, N., Khan, A. A. P., Rub, M. A., Azum, N., & Raizada, P. (2025). Harnessing 3D printing for tailored TiO<sub>2</sub> structures redefining organic pollutant degradation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(2), 116042. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116042>
- Mohamadpour, F., & Amani, A. M. (2024). Photocatalytic systems: Reactions, mechanism, and applications. *RSC Advances*, 14(29), 20609–20645. <https://doi.org/10.1039/D4RA03259D>
- Mpongwana, N., & Rathilal, S. (2022). A review of the techno-economic feasibility of nanoparticle application for wastewater treatment. *Water*, 14(10), 1550. <https://doi.org/10.3390/w14101550>
- Nian, J., Huang, Z., Zhao, Y., & Liu, K. (2026). Biomimetic spiral-reinforced honeycomb for integrated energy absorption under complex loading scenarios. *Biomimetics*, 11(4), 277. <https://doi.org/10.3390/biomimetics11040277>
- Paiu, M., Lutić, D., Favier, L., & Gavrilăscu, M. (2025). Heterogeneous photocatalysis for advanced water treatment: Materials, mechanisms, reactor configurations, and emerging applications. *Applied Sciences*, 15(10), 5681. <https://doi.org/10.3390/app15105681>
- Raut, A. (2007). *Polluted water at Dakshinkali* [Fotografía]. Flickr. CC BY-NC-SA 2.0. <https://www.flickr.com/photos/ankraut/538294558/>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Informe de medio ambiente: Agua*. [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Cap6\\_Agua.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Cap6_Agua.pdf)
- Swamy, K. R., Shyamala, G., Gurugubelli, T. R., Ravindran, G., & Bathula, B. (2026). Recent advancements of wastewater treatment by photocatalysis: A comprehensive review. *iScience*, 29(6), 116088. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2026.116088>
- United Nations Environment Programme. (2018, 22 de marzo). *World Water Day 2018: The answer is in nature*. <https://www.unep.org/events/un-day/world-water-day-2018-answer-nature>
- United Nations Human Settlements Programme, & World Health Organization. (2021). *Progress on wastewater treatment: Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.3.1*. <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/740e80a2-ab5b-449d-a368-a97d6f01bd10/content>
- Zendeli, A., Bui, M., Fischer, L., Ghasem-Zadeh, A., Schima, W., & Seeman, E. (2021). High cortico-trabecular transitional zone porosity and reduced trabecular density in men and women with stress fractures. *Journal of Clinical Medicine*, 10(5), 1123. <https://doi.org/10.3390/jcm10051123>
- Zhang, X., Jiang, L., Yan, X., Wang, Z., Li, X., & Fang, G. (2023). Regulated multi-scale mechanical performance of functionally graded lattice materials based on multiple bioinspired patterns. *Materials & Design*, 226, 111564. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111564>
- Zhao, X., Yu, X., Naz, S., Zhussupova, A., Kalyon, D. M., & Erksen, C. (2026). Longitudinal and radial microgradients in porosity and canal diameter in femur bone and its implications for bone regeneration and bone repair implants. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 14, 1789149. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2026.1789149>
- Zhao, Y., Bouffier, L., Xu, G., Loget, G., & Sojic, N. (2022). Electrochemiluminescence with semiconductor (nano)materials. *Chemical Science*, 13(9), 2528–2550. <https://doi.org/10.1039/D1SC06987J>
- Zhou, S., & Ding, J. (2025). Utilize natural forces in water treatment through 3D-printed structures: From purification to clean energy. *Advanced Materials*, 37(50), e09185. <https://doi.org/10.1002/adma.202509185>