



Ciencia para
las Políticas
Públicas



Estrategias para reforzar la fotocatalisis como tecnología clave para la transición climática, energética y sanitaria

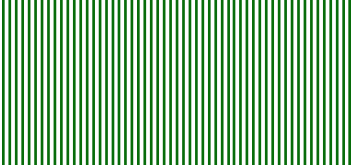
Coordinado por:

Marta Castellote · José Luis Hueso · Gerardo Colón



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

SCIENCE  POLICY



Ciencia para las Políticas Públicas



Informe de transferencia
de conocimiento



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

SCIENCE  POLICY

Este es un libro de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional [CC BY 4.0].
Más información sobre esta licencia en <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Las noticias, los asertos y las opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. La editorial, por su parte, solo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones.

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es>

EDITORIAL CSIC: <http://editorial.csic.es> [correo: editorialcsic@csic.es]



Departamento de Comunicación
Gabinete de Presidencia
CSIC, Calle Serrano 117
28006 Madrid
Correo: science4policy@csic.es

NIPO: 155-26-015-3
e-NIPO: 155-26-016-9
Depósito legal: M-6086-2026

Edición no venal

Coordinado en el marco de la Conexión Fotocatálisis por:
Marta Castellote
José Luis Hueso
Gerardo Colón

Colaboradores:
Andrea Martínez Topete

Coordinadores de la colección Ciencia para las Políticas Públicas:
Jorge Hernández-Moreno
Cindy Matos Ramos

Edición:
Marta García Gonzalo
Caja Alta Edición y Comunicación

Ilustraciones:
Freepress Coop

Diseño y maquetación:
David Pamplona Roche

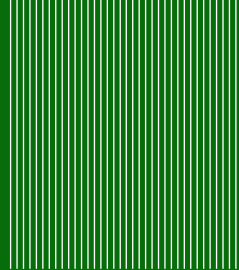
Como citar este informe: Castellote, M., Hueso, J. L., & Colón, G. [Coords.]. *Estrategias para reforzar la fotocatalisis como tecnología clave para la transición climática, energética y sanitaria*. CSIC.

Impreso en España. *Printed in Spain*

En esta edición se ha utilizado papel ecológico sometido a un proceso de blanqueado ECF, cuya fibra procede de bosques gestionados de forma sostenible.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.



EL CSIC tiene entre sus funciones la de informar, asistir y asesorar en materia de ciencia y tecnología a entidades públicas y privadas, según recoge el artículo 5 de su estatuto. Así, este documento presenta la fotocatalisis como una tecnología habilitadora con un alto potencial para dar respuesta a desafíos prioritarios, como la protección de la salud, la mejora de la calidad ambiental, el avance hacia una transición energética sostenible y el impulso de la competitividad industrial. Su carácter transversal y su capacidad para generar beneficios ambientales, sociales y económicos la convierten en una opción estratégica para el diseño de políticas públicas orientadas a un desarrollo más saludable, resiliente y competitivo.

ÍNDICE

uno

|||||

La tecnología fotocatalítica y los desafíos actuales

- 1.1. ¿Qué es la fotocatalisis y cómo funciona?
- 1.2. Capacidades de la fotocatalisis para plantear soluciones a los desafíos ambientales, de salud y energéticos

dos

|||||

Contribuciones del CSIC a la investigación e innovación en fotocatalisis

- 2.1. Apuesta por la investigación integral en fotocatalisis
- 2.2. Desarrollo de aplicaciones estratégicas de la fotocatalisis en el CSIC
- 2.3. Escalado y transferencia

tres

|||||

Conclusiones y recomendaciones

cuatro

|||||

Listado de centros del CSIC en la Conexión Fotocatalisis

cinco

|||||

Para saber más





UNO



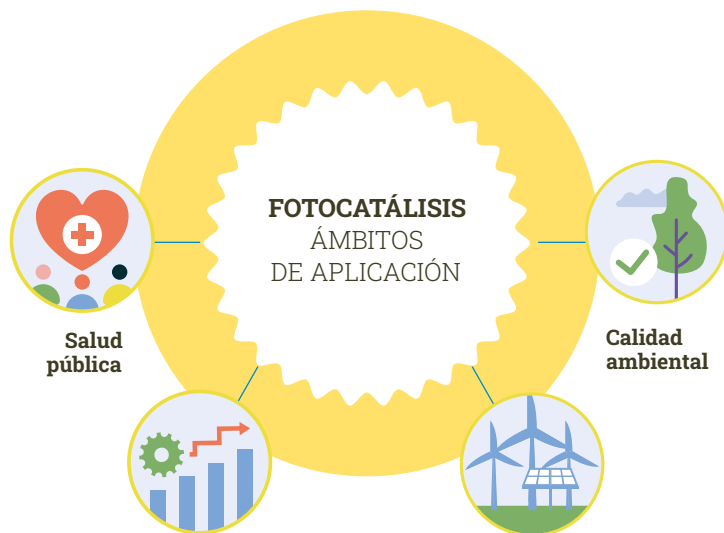
La tecnología fotocatalítica y los desafíos actuales



A principios de 1874, el visionario escritor Julio Verne dijo: «El agua será el carbón del futuro» en su relato de ciencia ficción *La isla misteriosa*. Décadas más tarde, a comienzos del siglo xx, el profesor Giacomo Ciamician, de la Universidad de Bolonia y pionero en los estudios de las reacciones fotocatalíticas, ya especuló que el empleo de procesos altamente energéticos basados en transformaciones fotoquímicas limpias y eficientes tendría un impacto ecológico drástico y beneficioso para la sociedad. Desde entonces, se han producido avances significativos en el campo de la fotoquímica.

Hablar hoy de *fotocatálisis*, proceso que permite acelerar reacciones químicas utilizando la luz, no es referirse a una moda tecnológica, sino a una pieza concreta que forma parte de un engranaje más amplio que vincula **la salud pública, la calidad ambiental, la transición energética y la competitividad industrial**.

Figura 1 Principales ámbitos de aplicación de la fotocatalísis



ELABORACIÓN PROPIA

A nivel europeo se persigue un triple objetivo. Por un lado, se pretende **proteger la salud** reduciendo la exposición a elementos contaminantes presentes principalmente en la atmósfera y en entornos urbanos, así como en ambientes interiores (edificios, escuelas u hospitales), y garantizando el suministro de agua para un consumo seguro frente a sustancias tóxicas emergentes (fármacos, pesticidas o disruptores endocrinos), además de explorar nuevas vías terapéuticas.

El segundo objetivo consiste en encontrar **nuevas alternativas que permitan mantener la neutralidad en emisiones procedentes** de la generación de energía con tecnologías dependientes de la química del carbono (industria petroquímica y combustibles fósiles) y, al mismo tiempo, **buscar nuevos vectores energéticos alternativos más sostenibles** que impliquen una descarbonización progresiva.

En tercer y último lugar, se aspira a **cumplir con un marco regulatorio cada vez más estricto**, que exige resultados medibles con horizonte en el año 2030. En este sentido, la fotocatalisis se ha ido consolidando como una **tecnología habilitadora**: no sustituye a las medidas estructurales (control de emisiones en origen, ventilación y filtración adecuadas, tratamientos convencionales de agua o higiene ambiental), pero sí añade capacidad allí donde las soluciones estándar se muestran insuficientes o demasiado costosas para capturar el último tramo de beneficio sanitario y ambiental. Esta idea de complementariedad es esencial para comprender su lugar en la política pública.

Los desafíos a los que nos enfrentamos, y para los que la fotocatalisis presenta una elevada potencialidad, están claramente dimensionados por los organismos oficiales. **En relación con la necesidad de energía limpia**, en 1988 la **Organización Meteorológica Mundial** (OMM) y el **Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente** (PNUMA) crearon el **Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático** (IPCC, por sus siglas en inglés), cuya función es evaluar la ciencia relacionada con el cambio climático. En su último informe, de 2023, este organismo confirmó que el calentamiento global ya ha superado en **cerca de 1,1 °C** la temperatura media de la era preindustrial.



Asimismo, calcula que las emisiones actuales de gases de efecto invernadero nos conducen hacia un escenario de un aumento de **2,7 °C para el año 2100**, si no se intensifican las políticas de mitigación. Si la temperatura global supera 1,5 °C, los riesgos para los ecosistemas y las personas —incluidas las sequías, las olas de calor, las pérdidas agrícolas y los eventos extremos— aumentarán de forma significativa. Recientemente, en la cumbre del clima de Dubái — la COP-28—, celebrada en diciembre de 2023, se incluyó por primera vez un reconocimiento explícito de la necesidad de **«abandonar progresivamente todos los combustibles fósiles»** en los sistemas energéticos, de forma justa, ordenada y equitativa. En este marco, el **hidrógeno se plantea como uno de los vectores energéticos del futuro**.

Desde una perspectiva medioambiental y sanitaria, en 2021 la contaminación del aire —tanto exterior como en espacios interiores— fue responsable de aproximadamente 8,1 millones de muertes globales, según el **Informe sobre el Estado del Aire Global 2024**, elaborado por el **Health Effects Institute (HEI)** en colaboración con **UNICEF**. Por otra parte, según la misma fuente, ese mismo año se registraron más de **700 000 fallecimientos en menores de 5 años** asociados a la contaminación del aire, lo que supone alrededor del 15 % de todas las defunciones en ese grupo de edad.

Asimismo, la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) ha señalado recientemente que los ciudadanos europeos están expuestos a niveles de contaminación urbana muy superiores a los recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y ha estimado que cerca de 240 000 muertes anuales son atribuibles a la contaminación en la Unión Europea. Se trata, además, una realidad que la ciudadanía percibe de manera directa en su vida cotidiana: picos de contaminación urbana, malestar en días de mala calidad del aire, preocupación por espacios interiores saturados o mal ventilados y dudas recurrentes sobre la seguridad del agua del grifo ante la presencia informada de disruptores endocrinos y sustancias per- y polifluoroalquiladas, a las que recientemente se han sumado los microplásticos.

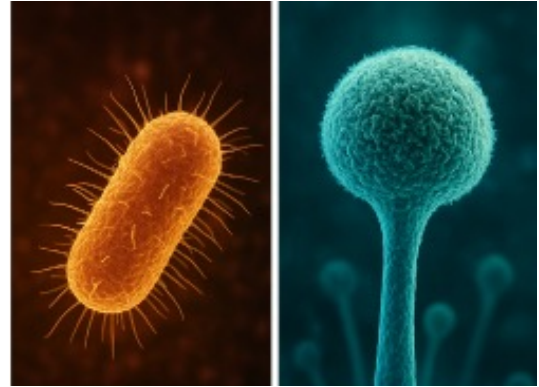
Figura 2 Impacto de la contaminación ambiental y patógenos emergentes en la mortalidad global



ELABORACIÓN PROPIA



Otro aspecto relevante del ámbito sanitario que requiere gran atención es el creciente aumento de las **infecciones causadas por cepas de microorganismos patógenos** que demuestran una resistencia cada vez mayor a los tratamientos farmacológicos convencionales. La reciente pandemia de la COVID-19 en 2020 puso de manifiesto nuestra vulnerabilidad ante infecciones sobrevenidas. Los datos más recientes del Centro Europeo para la Prevención y el Control de las Enfermedades (ECDC, por sus siglas en inglés) revelaron, a partir de un estudio realizado con datos de más de 23 000 pacientes y 105 hospitales, que España se encuentra por encima de la media europea en la prevalencia de enfermedades infecciosas adquiridas en entornos sanitarios y en el consumo de antibacterianos. Según datos basados en un **análisis publicado en *The Lancet***, en 2024, las denominadas *superbacterias* ya causan más de **1,2 millones de muertes directas al año en el mundo** y la resistencia antimicrobiana amenaza con superar al cáncer como principal causa de muerte para 2050 si no se actúa con urgencia.



Los hongos suponen otra fuente creciente de preocupación. La infección fúngica por *Candida Auris* se ha convertido en una amenaza sanitaria global: en poco más de una década ha pasado de casos aislados a elevadas tasas de resistencia a múltiples antifúngicos y una alta mortalidad en pacientes vulnerables tanto en Estados Unidos como en Europa. Al respecto, **la tecnología fotocatalítica emerge como una vía prometedora para abordar cada uno de estos desafíos.**

11.

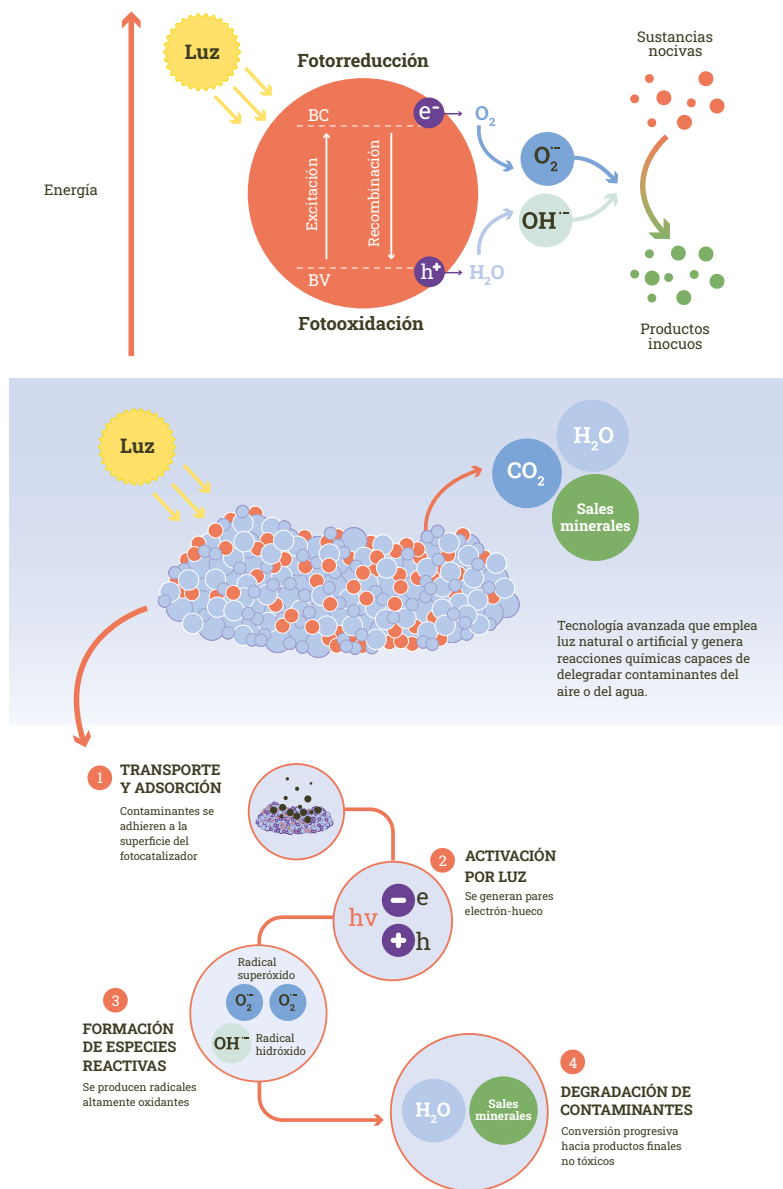
¿Qué es la fotocátalisis y cómo funciona?

La fotocátalisis es un proceso que permite acelerar reacciones químicas utilizando la luz. Para ello, se emplean materiales semiconductores, que captan la energía de la luz —como la del sol, la ultravioleta o la visible— y la transforman en energía útil para superar las barreras que impiden que ocurra una reacción química.

De una forma simplificada, se puede decir que en un semiconductor, los electrones ocupan niveles de energía organizados en bandas. Entre la **banda de valencia** y la **banda de conducción** hay una **banda prohibida** (*bandgap*). Para que un electrón salte de la banda de valencia a la de conducción, necesita un aporte de energía superior al *bandgap*, proporcionado por la luz. Así, cuando se irradia un semiconductor con energía suficiente, el salto electrónico genera pares de carga (electrones y huecos) que pueden interactuar con las moléculas del entorno mediante procesos redox, dando lugar a reacciones químicas como la descomposición de contaminantes o la producción de hidrógeno. El hueco posee capacidad oxidante, mientras que el electrón tiene capacidad reductora. De este modo, el término *redox* refleja la combinación simultánea de procesos de **reducción** y **oxidación** que tienen lugar durante la fotocátalisis y son los responsables últimos de la transformación química de las moléculas del entorno. Así, la fotocátalisis convierte la luz en energía química aprovechando la estructura electrónica de los semiconductores. Se trata de una forma limpia y eficiente de utilizar la luz para transformar sustancias.

Los valores específicos de potencial redox necesarios para resolver un problema concreto de reducción u oxidación son cruciales para la elección de un fotocatalizador candidato adecuado para cada reacción. Esta elección se determina por las posiciones de sus bandas de valencia y conducción, así como por el valor de su banda prohibida. Al modular estos parámetros mediante la síntesis del fotocatalizador y un diseño óptimo de los fotorreactores, es posible adaptar la tecnología a las exigencias de cada proceso.

Figura 3 Fotoactivación de un material semiconductor, generación de especies reactivas y etapas para la descontaminación



ELABORACIÓN PROPIA

12.

Capacidades de la fotocatalisis para plantear soluciones a los desafíos ambientales, de salud y energéticos

LA AEMA cifra en cerca de 240 000 las muertes anuales atribuibles a la exposición a partículas en suspensión (PM_{2,5}), unas 70 000 por ozono y aproximadamente 50 000 por los óxidos de nitrógeno (NO_x). Estos valores no son meras cifras: representan una creciente presión asistencial, una pérdida de productividad y profundas desigualdades territoriales y sociales que se traducen en retos concretos y responsabilidades para los poderes públicos.

En la 78.^a **Asamblea Mundial de la Salud** y en el marco de la Segunda Conferencia Mundial de la OMS sobre Contaminación del Aire y Salud (celebrada en mayo de 2025), los Estados miembros acordaron reducir a la mitad el impacto sanitario de la contaminación atmosférica para el año 2040, en comparación con los niveles de 2015. En una acción sin precedentes, cerca de 50 millones de profesionales de la salud, pacientes, representantes de la sociedad civil y ciudadanos de todo el mundo se sumaron a un llamamiento urgente para:

- **Implementar plenamente las directrices mundiales de calidad del aire de la OMS** y adoptar medidas estrictas para frenar la contaminación en su origen.
- **Garantizar una transición energética justa e inclusiva**, mediante la eliminación progresiva de los combustibles fósiles.
- **Fortalecer la vigilancia y el control** de la calidad del aire, así como la capacidad institucional para hacer frente al cambio climático.
- **Incrementar la financiación, tanto nacional como internacional**, de modo que sitúe el aire limpio como una prioridad en las agendas políticas y sanitarias.
- **Constituir equipos intersectoriales capacitados** para diseñar e implementar políticas públicas eficaces, fomentando la investigación, la formación y el intercambio de buenas prácticas, especialmente en los países más afectados.



De cumplirse ese objetivo, podrían **evitarse aproximadamente cuatro millones de fallecimientos al año. Todos estos aspectos están relacionados con la tecnología fotocatalítica**, que tiene el potencial para ofrecer soluciones tecnológicas a importantes retos actuales, lo que la convierte en una candidata estratégica para la formulación de políticas públicas en distintos ámbitos:

Medioambiente y salud pública

La calidad medioambiental constituye uno de los principales determinantes de la salud pública a escala global. La contaminación del aire y del agua, tanto en entornos exteriores como interiores, está estrechamente vinculada a un aumento de la morbilidad y la mortalidad asociadas a enfermedades respiratorias, cardiovasculares, infecciosas y oncológicas. En este contexto, el desarrollo y la implementación de tecnologías capaces de reducir de forma eficaz los contaminantes ambientales adquieren un papel estratégico para la protección de la salud y la mejora de la calidad de vida de la población. La fotocatalisis emerge así como una herramienta tecnológica con un elevado potencial para abordar de manera integrada los retos ambientales y sanitarios actuales.

Contaminación del aire y del agua

La contaminación del aire sigue siendo una de las principales amenazas para la salud global. En 2019 causó cerca de **4,2 millones de muertes prematuras**, sobre todo por enfermedades cardiovasculares y respiratorias, y casi el **90 %** de ellas se produjeron en países de ingresos bajos y medios. En 2023, solo **12 regiones del mundo** cumplieron con los niveles de calidad del aire recomendados por la OMS.

En **Europa**, aunque la tendencia general muestra una mejora gradual, la situación sigue siendo preocupante: en 2022, el **96 % de la población urbana** estuvo expuesta a concentraciones de partículas finas ($PM_{2.5}$) superiores a las directrices de la OMS, y en 2023 el **40 % de los puntos urbanos** superaron los límites de óxidos de nitrógeno. En **España**, alrededor de **33 millones de personas** —aproximadamente dos tercios de la población— respiraron aire más contaminado que el permitido por los nuevos límites lega-



Boina de contaminación
en Madrid. ADOBE STOCK

les europeos fijados para el horizonte de 2030. Si se consideran las recomendaciones más estrictas de la OMS, **la totalidad de la población** estuvo expuesta a niveles perjudiciales.

También preocupa la **calidad del aire interior**, especialmente en edificios cada vez más herméticos por razones de eficiencia energética. En 2016, la contaminación del aire interior provocó aproximadamente **3,8 millones de fallecimientos** en el mundo, principalmente asociados al uso doméstico de combustibles fósiles. En la Unión Europea, en 2020, se registraron al menos **238 000 muertes prematuras** asociadas a la exposición a partículas finas. En **España**, la exposición a contaminantes interiores, como el radón, el dióxido de carbono o los compuestos orgánicos volátiles (COV), se asocia con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, así como con un mayor riesgo de cáncer.



Contaminación de
ecosistemas acuáticos.
DESIGNED BY FREEPIK

Por otra parte, en lo que respecta a la calidad del agua, a nivel mundial, alrededor del **80 % de las aguas residuales** se vierten sin tratar, contaminando ríos, lagos y océanos. Más de **2000 millones de personas** viven en países con escasez de agua y en 2022, alrededor de **1700 millones** consumieron agua contaminada con heces, según la OMS. Estas cifras reflejan un grave riesgo para la salud pública y la sostenibilidad de los ecosistemas.

En **Europa**, el problema se centra en los contaminantes **emergentes y persistentes**, como pesticidas, nutrientes y productos farmacéuticos. En **España**, según datos del **Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD)** en 2022, el **22 % de las aguas superficiales** y el **23 % de las subterráneas** estaban afectadas por la contaminación por **nitratos**, principalmente debido a la **ganadería intensiva** y otras actividades agrarias e industriales. En algunas zonas también hay problemas de contaminación microbiológica.

Al respecto, la **fotocatálisis** se presenta como una tecnología prometedora para mejorar la calidad del agua. Permite la **eliminación de microcontaminantes** difíciles de tratar, como fármacos, pesticidas o cosméticos, y la **desinfección de patógenos** (incluidos virus como el SARS-CoV-2 y bacterias resistentes a antibióticos). Combinada con otros procesos, como la reacción **foto-Fenton** o la **fotoelectrocatalisis**, puede ofrecer soluciones eficaces para el tratamiento de **aguas residuales complejas y efluentes hospitalarios**, así como para la **regeneración y reutilización del agua**.

Principios básicos del proceso de oxidación fotocatalítica para la eliminación de contaminantes del aire y del agua

La **oxidación fotocatalítica** es una tecnología avanzada que aprovecha la **energía de la luz** —natural o artificial— para eliminar contaminantes del **aire** y del **agua**. Se basa en el uso de **semiconductores** (como el dióxido de titanio [TiO_2]) que, al ser iluminados, activan una serie de reacciones químicas capaces de descomponer compuestos nocivos en sustancias finales inocuas como **el agua, el dióxido de carbono o sales minerales**.

En términos simples, el proceso puede dividirse en cuatro etapas:

1. **Transporte y adsorción:** los contaminantes alcanzan la superficie del fotocatalizador y se adsorben en ella.
2. **Activación por luz:** cuando el material recibe fotones con energía suficiente, se generan pares de electrón-hueco, lo que desencadena reacciones químicas.
3. **Formación de especies reactivas:** estos electrones y huecos interactúan con el oxígeno o el agua presentes, dando lugar a especies reactivas de oxígeno, como los radicales hidroxilo y superóxido.
4. **Degradación de contaminantes:** las especies reactivas transforman progresivamente las moléculas contaminantes hasta convertirlas en productos finales no tóxicos.



En el **aire**, la fotocatalisis actúa sobre contaminantes comunes como los **óxidos de nitrógeno** y los **COVs**, responsables de problemas de salud y de contaminación urbana:

- Los **óxidos de nitrógeno**, procedentes del tráfico o de la industria, se oxidan y se convierten en **nitratos**.
- Los **COVs**, como el **formaldehído** o el **tolueno**, se degradan progresivamente hasta su completa mineralización en **dióxido de carbono y agua**.

Este proceso mejora la **calidad del aire exterior urbano** y del **interior de los edificios**, donde la acumulación de contaminantes procedentes de materiales de construcción, mobiliario y productos de limpieza representa un riesgo creciente para la salud.

En el caso del **agua**, la fotocatalisis se emplea para **purificar, regenerar y desinfectar** aguas contaminadas. Es especialmente eficaz frente a **microcontaminantes emergentes** —como fármacos, pesticidas o cosméticos—, difíciles de eliminar mediante tratamientos convencionales. Durante el proceso, el oxígeno disuelto participa en la formación de radicales oxidantes que degradan tanto contaminantes orgánicos como microorganismos. La tecnología permite inactivar **bacterias, virus (incluido el SARS-CoV-2), hongos y protozoos**, contribuyendo así a una mayor seguridad sanitaria del agua.

Combinada con otros métodos avanzados, la fotocatalisis ofrece soluciones prometedoras para el tratamiento de aguas residuales urbanas, industriales y hospitalarias, así como para la reutilización segura del agua en contextos de escasez.

En conjunto, la fotocatalisis representa una forma limpia, eficiente y sostenible de aprovechar la energía de la luz para reducir la contaminación del aire y del agua, contribuyendo al mismo tiempo a los objetivos globales de sostenibilidad, salud y transición ecológica.

Materiales autolimpiantes

Las caídas durante la limpieza de fachadas son una causa significativa de muertes laborales en los sectores de la construcción y el mantenimiento. Por otra parte, además de los costes humanos y sanitarios derivados de los tratamientos y las secuelas de accidentes, los costes económicos globales asociados a estas tareas de mantenimiento se estimaron en **12 500 millones de dólares en 2024**, con una tasa de crecimiento anual compuesto del **6,2%** (<https://www.linkedin.com/pulse/facade-cleaning-maintenance-service-market-viewpoints-trends-aanef/>). A este respecto, las superficies fotocatalíticas con propiedades autolimpiantes pueden integrarse en materiales de construcción (fachadas, pavimentos, pinturas...) y en textiles, contribuyendo a reducir el deterioro, las tareas y los costes de mantenimiento tanto en entornos urbanos como en el patrimonio cultural.



Limpieza tradicional de cristales en edificios.

Estas superficies son capaces de fotooxidar compuestos orgánicos e inorgánicos en presencia de luz, lo que permite mantenerlas limpias de forma pasiva. Es preciso señalar que no todos los materiales fotocatalíticos presentan propiedades autolimpiantes, del mismo modo que no todos los materiales autolimpiantes son necesariamente fotocatalíticos. Este comportamiento diferencial está directamente relacionado con la hidrofilia superficial, una propiedad clave en los mecanismos de autolimpieza. La fotocatalisis implica la mineralización de compuestos mediante la generación de radicales cuando un material se excita con radiación de longitud de onda adecuada, mientras que la hidrofilia se refiere a la capacidad de la superficie para interactuar con el agua y favorecer la eliminación física de los residuos. Para lograr un efecto autolimpiante eficaz, resulta crucial mantener un equilibrio adecuado entre ambas propiedades.



Producción y conversión de energía

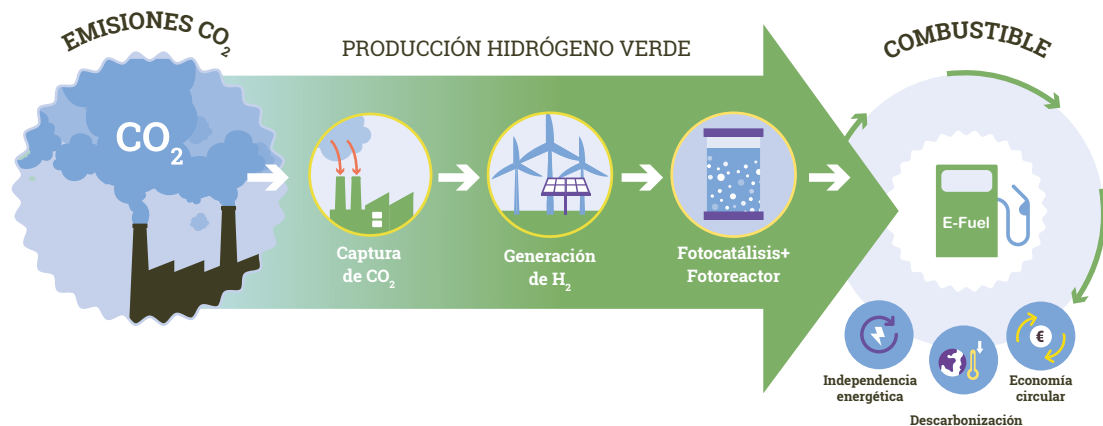
La **fotocatálisis** es una tecnología emergente con un enorme potencial para la **producción y conversión de energía**, especialmente en el contexto de **generación de hidrógeno** y **reducción del dióxido de carbono** con fines energéticos. En particular, la producción de hidrógeno verde mediante fotocátalisis se perfila como una de las vías más prometedoras en el ámbito de la energía limpia, ya que permite obtener **hidrógeno a partir de agua y luz solar**, sin necesidad de aportes eléctricos externos ni de emisiones contaminantes, contribuyendo así a la economía circular y a la descarbonización.

Por otro lado, **la valorización del dióxido de carbono** constituye una línea de investigación en expansión orientada a transformar este gas de efecto invernadero en **productos de valor añadido**, como **combustibles solares** (metano, metanol, monóxido de carbono, etc.) o **materias primas químicas**, mediante el uso de luz solar y fotocatalizadores. Esta estrategia se enmarca en la **economía circular del carbono** y en la **descarbonización industrial**, complementando las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono y facilitando la conversión de la energía solar en vectores químicos.

Producción de hidrógeno

Los investigadores japoneses Fujishima y Honda, demostraron en 1972 que era posible excitar el TiO_2 en una célula fotoelectroquímica para inducir la disociación de la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno. Este resultado científico pionero ha servido de base para un amplio campo de estudio de la fotocátalisis centrado en la reacción de disociación del agua (*water splitting*). El hidrógeno es una molécula clave para la industria química y se utiliza en numerosos procesos para generar compuestos útiles, así como para la producción de energía. Ambas áreas de aplicación, y especialmente esta última, adquieren una relevancia estratégica en un contexto de economía circular y de transición hacia modelos energéticos más sostenibles, alineados con los objetivos de descarbonización que se persiguen para un futuro próximo.

Figura 4 Procesos de revalorización de CO₂ para la obtención de combustibles neutros en carbono



ELABORACIÓN PROPIA

Los beneficios de la utilización del hidrógeno como fuente de energía en el transporte, los hogares y la industria se derivan, principalmente, de tres factores. En primer lugar, de su disponibilidad potencialmente ilimitada, asociada a su alta abundancia en la Tierra en comparación con otros elementos químicos. En segundo lugar, de su elevada capacidad como vector de almacenamiento energético, casi tres veces superior, por unidad de volumen, a la de fuentes clásicas como el metano. Por último, a la posibilidad de controlar las emisiones y la contaminación asociadas al carbono, ya que estas pueden abordarse en la fase inicial de generación del combustible, y no en el momento de la liberación de la energía, lo que permite una emisividad nula o prácticamente nula. Con independencia de su uso final, se espera que el hidrógeno se produzca de forma masiva en un futuro próximo mediante procesos neutros en carbono y, por tanto, más favorables desde el punto de vista medioambiental.

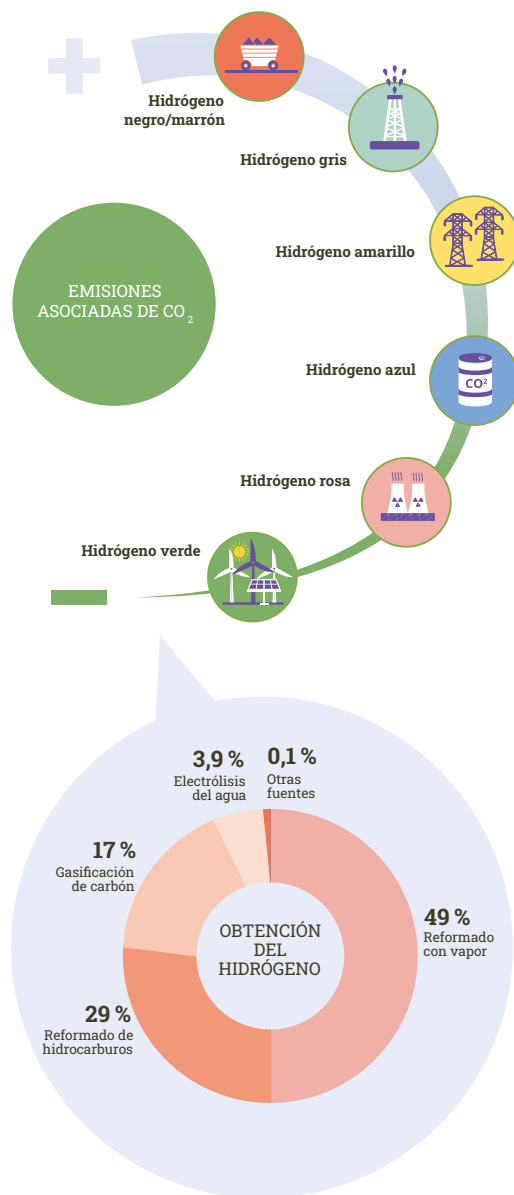


En particular, la producción del denominado *hidrógeno verde*, empleando catalizadores convencionales y moléculas procedentes de biorresiduos que actúan como agentes de sacrificio, constituye en la actualidad un campo de investigación de gran interés. Sin embargo, la transferencia de estas aproximaciones al ámbito industrial todavía requerirá mejoras sustanciales en la eficiencia y viabilidad de los procesos propuestos, con el fin de competir con tecnologías consolidadas, como el reformado en seco del metano.

La producción y el uso globales del hidrógeno han experimentado un crecimiento constante, según el informe *Global Hydrogen Review 2024* de la Agencia Internacional de la Energía. Sin embargo, en el año 2022, más del 95 % del hidrógeno que la industria produjo fue sucio, hasta el punto de que su producción se tradujo en la emisión de alrededor de 900 millones de toneladas de dióxido de carbono. En España, el consumo de hidrógeno es mayoritariamente **gris**.

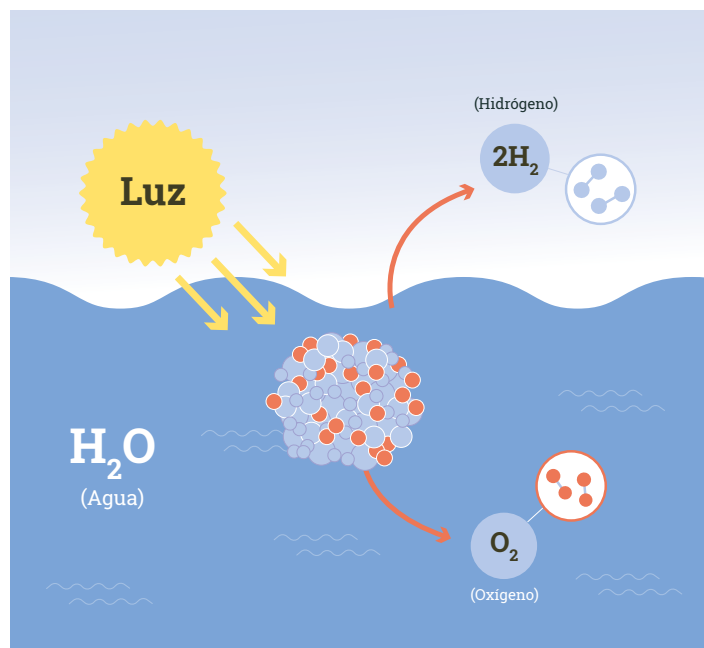
La descarbonización del planeta es uno de los objetivos que se han marcado países de todo el mundo para el horizonte de 2050. En este marco, la producción de **hidrógeno verde** empleando energía renovable se revela como una de las palancas fundamentales. En consecuencia, la generación de hidrógeno mediante fotocatalisis se presenta como una solución prometedora para satisfacer la creciente demanda de combustibles limpios.

Figura 5 Tecnologías actuales de producción de hidrógeno y su huella de CO₂



ELABORACIÓN PROPIA

Figura 6 Producción fotocatalítica de hidrógeno



ELABORACIÓN PROPIA

Producción de hidrógeno por *water splitting*

Desde el punto de vista termodinámico, la reacción de *water splitting* puede considerarse un proceso energéticamente desfavorable, ya que la disociación de agua (H₂O) en hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂) es altamente endotérmica. Entre los numerosos semiconductores fotoactivos propuestos en la bibliografía en los últimos años para las reacciones de disociación del agua, el dióxido de titanio (TiO₂) sigue siendo, hasta el momento, uno de los más eficientes.

No obstante, las eficiencias fotónicas descritas para la producción de hidrógeno mediante el desdoblamiento fotocatalítico del

agua por TiO₂ siguen siendo bajas, lo que limita significativamente el escalado de este proceso a nivel industrial. Tal como se ha señalado ampliamente en la literatura científica, el *water splitting* utilizando TiO₂ como semiconductor modelo aún presenta rendimientos muy reducidos.

Por este motivo, podrían utilizarse agentes de sacrificio —como alcoholes, polioles u otras moléculas orgánicas oxigenadas— para mejorar la productividad de hidrógeno. Este proceso se conoce como *fotoreformado*.



Producción de hidrógeno por fotoreformado a partir de compuestos oxigenados

La oxidación de compuestos orgánicos de sacrificio que participen en la semirreacción de oxidación mejoraría el rendimiento de la semirreacción de reducción. Si consideramos los compuestos renovables como moléculas sacrificables, el interés del proceso aumentaría al mismo tiempo que la eficacia.

La reacción de fotoreformado se estudió inicialmente empleando metanol como molécula de sacrificio, por tratarse del compuesto más simple. No obstante, investigaciones más recientes exploran el uso de moléculas más complejas y, en algunos casos, derivados de la biomasa o incluso de compuestos contaminantes y microplásticos, lo que confiere a este proceso un interés adicional desde el punto de vista energético y medioambiental.

Tal como se ha señalado anteriormente, la producción de hidrógeno mediante procesos de fotoreformado presenta dos ventajas claras frente a la reacción de disociación del agua. En primer lugar, permite mejorar la semirreacción de reducción desde el punto de vista cinético y, en segundo lugar, el empleo de sustratos derivados de la biomasa como agentes de sacrificio aporta un valor añadido al proceso global. Este enfoque acoplado podría constituir un método rentable y respetuoso con el medioambiente para el tratamiento de aguas residuales, con producción simultánea de energía.

En este contexto, el uso de compuestos derivados de la biomasa, como los hidratos de carbono, está despertando un interés creciente como materia prima abundante, renovable y limpia para la producción de hidrógeno. No obstante, en términos generales, la mayor complejidad de la estructura molecular de los carbohidratos, en comparación con la de los alcoholes simples (metanol o etanol), se traduce en una menor productividad.

Otra alternativa surge del empleo de sustratos oxigenados no derivados de la biomasa, como residuos contaminantes o incluso microplásticos. Esta aproximación, basada en el acoplamiento de los procesos de producción de hidrógeno y degradación de contaminantes —tales como colorantes, aldehídos, compuestos



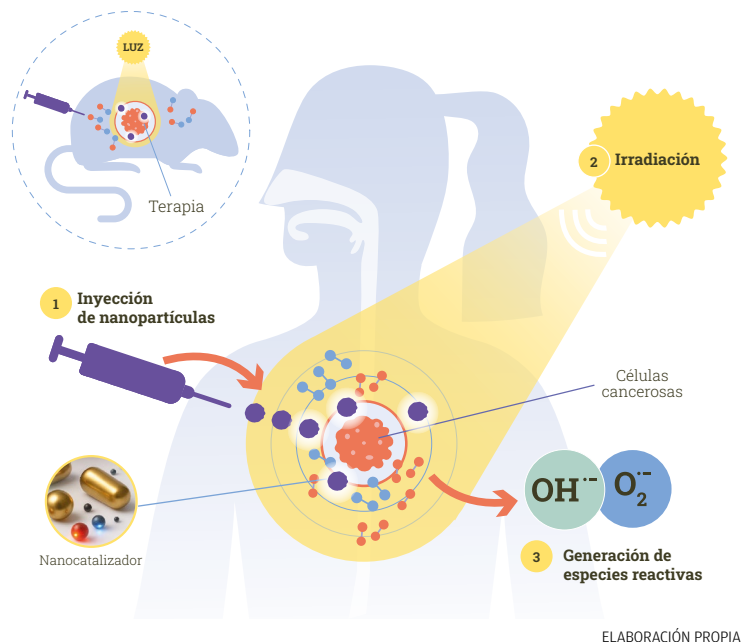
fenólicos o incluso aguas residuales de almazara—, resulta de gran relevancia desde el punto de vista ambiental y energético.

Salud y biomedicina

Más allá del tratamiento y la prevención de infecciones causadas por microorganismos, la aplicación de la luz en el ámbito de la salud ofrece también posibilidades para el tratamiento de diversas enfermedades y de determinados tipos de cáncer. El enfoque clínico más extendido es la **terapia fotodinámica**, que generalmente implica el uso de agentes fotosensibilizadores, como el **5-aminolevulínico**, que se activan mediante luz visible o infrarroja cercana para generar especies reactivas de oxígeno de forma localizada en la zona irradiada. En la actualidad, existen tratamientos bien establecidos en fase clínica para cánceres de cabeza, cuello, esófago y cérvix uterino. En Europa, esta terapia también se ha aprobado recientemente como tratamiento de refuerzo para el cáncer de próstata de bajo riesgo. Además, la terapia fotodinámica se aplica de manera habitual en tratamientos dermatológicos y oftalmológicos, en combinación con agentes fotodinámicos comerciales de eficacia contrastada y, en menor medida, en el ámbito odontológico.

No obstante, el potencial de crecimiento y de aplicación de la fotocatalisis en terapia se encuentra todavía en una fase muy preliminar. Ello se debe, en parte, a que la eficacia de la terapia fotodinámica suele verse limitada por la baja disponibilidad de oxígeno en el entorno tumoral, lo que reduce la generación de especies reactivas. En este contexto, ha surgido un campo de investigación en rápido desarrollo que busca aprovechar la **capacidad fotocatalítica de materiales nanoestructurados** para aumentar la eficacia de los fotosensibilizadores actuales. Muchos de estos materiales presentan la capacidad de activarse selectivamente bajo irradiación luminosa para generar especies reactivas de oxígeno a partir de otros metabolitos, como el peróxido de hidrógeno, producir oxígeno *in situ* en ambientes hipóxicos, inhibir los mecanismos de protección de las células tumorales —mediante la eliminación de especies antioxidantes que actúan como escudos celulares— y reducir la disponibilidad de metabolitos clave necesarios para satisfacer las elevadas demandas energéticas de las células cancerígenas, como aminoácidos y glucosa.

Figura 7 Fotocatálisis para terapia



Uno de los grandes desafíos en este sentido es desarrollar materiales con respuesta fotocatalítica en el rango del infrarrojo cercano para favorecer una mayor penetración efectiva de la luz. En este sentido, los materiales híbridos buscan mejorar la respuesta de fotocatalizadores que, por lo general, solo responden en el rango del espectro electromagnético que abarca tanto la luz ultravioleta como la luz visible (UV/vis).

También resultará de vital importancia establecer controles y protocolos estandarizados para determinar la dosificación de la luz, la biodistribución y la citotoxicidad de los materiales evaluados. Por último, cabe destacar que actualmente existe también un amplio margen de desarrollo en el estudio del efecto sinérgico resultante de combinar terapias basadas en luz que, además de generar especies reactivas de oxígeno, favorezcan aumentos controlados de temperatura para impulsar procesos de ablación fototérmica con la ayuda de otros tipos de nanopartículas basadas en metales preciosos, como el oro.

dos



Contribuciones del CSIC a la investigación e innovación en fotocatalisis



ESPAÑA, a través del CSIC, ha logrado situarse a la vanguardia internacional de este campo gracias a una articulación eficaz entre investigación básica, desarrollo tecnológico, innovación industrial, formación de personal y divulgación científica. El CSIC impulsa la investigación en el campo de la fotocatalisis, tanto básica como aplicada, estructurada en diversos bloques temáticos: desarrollo de materiales y procesos, desarrollo de técnicas de caracterización, aplicación a distintas áreas estratégicas, infraestructuras experimentales y transferencia tecnológica a la industria. Todo ello se apoya en numerosos proyectos colaborativos nacionales e internacionales.



ADOBE STOCK

21.

Apuesta por la investigación integral en fotocátalisis

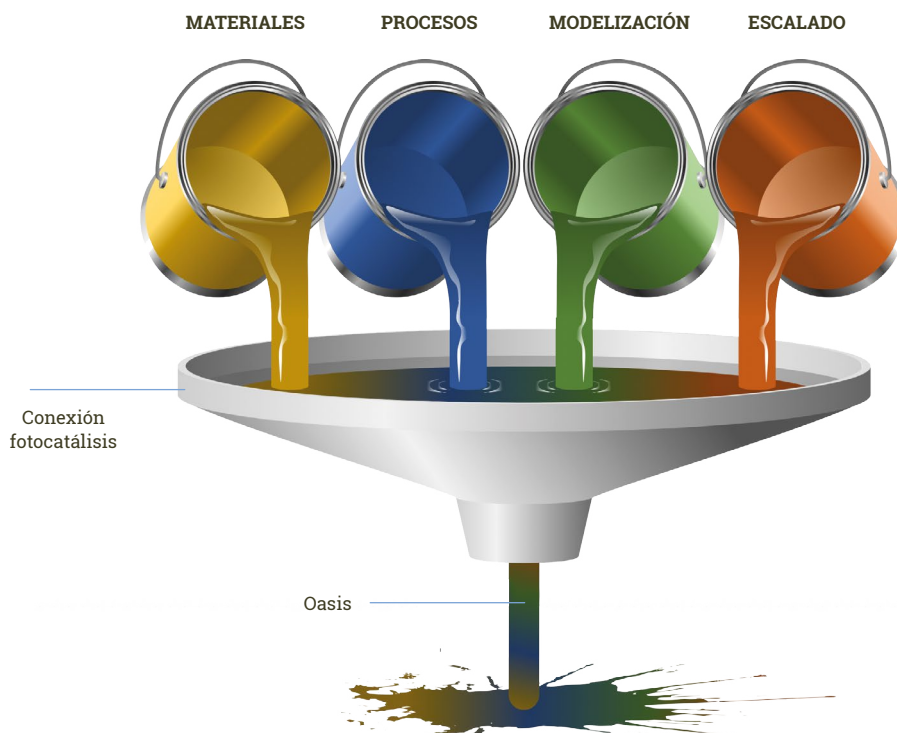
LAS actividades de investigación del CSIC en fotocátalisis se han articulado recientemente a través de la red Conexión Fotocatálisis, que integra 45 grupos de investigación estratégicos a nivel nacional mediante un **enfoque multidisciplinar** que abarca:

- Desarrollo de nuevos materiales y procesos innovadores.
- Técnicas avanzadas de caracterización.
- Aplicaciones en áreas estratégicas de medioambiente, energía y salud.
- Infraestructuras experimentales de alto nivel para ensayos piloto.
- Transferencia tecnológica.

Dentro de estas líneas de aplicación, el CSIC es un referente a nivel mundial y participa en numerosos proyectos y líneas de investigación específicas, que abarcan desde el diseño y desarrollo de nuevos materiales fotocatalíticos —como sistemas híbridos, heteroestructurados o la integración de membranas fotocatalíticas— hasta el estudio de procesos avanzados de oxidación y la modelización a diferentes escalas. Una de las grandes fortalezas del CSIC radica en su capacidad para combinar la síntesis de materiales, la caracterización avanzada, el diseño de reactores, el escalado de procesos y el análisis normativo, con el fin de asegurar la transferencia efectiva al sector productivo.

Además, la Conexión Fotocatálisis del CSIC tiene un marcado carácter social, ya que aborda retos íntimamente relacionados con la economía circular, la descarbonización, la calidad del aire que respiramos, la gestión eficiente del agua y de la energía, así como con la medicina personalizada, al explorar aplicaciones disruptivas todavía no plenamente explotadas en la industria nacional e internacional.

Figura 8 Conexión Fotocatálisis [Oasis]- CSIC



SPACE TECHNOLOGY R&D

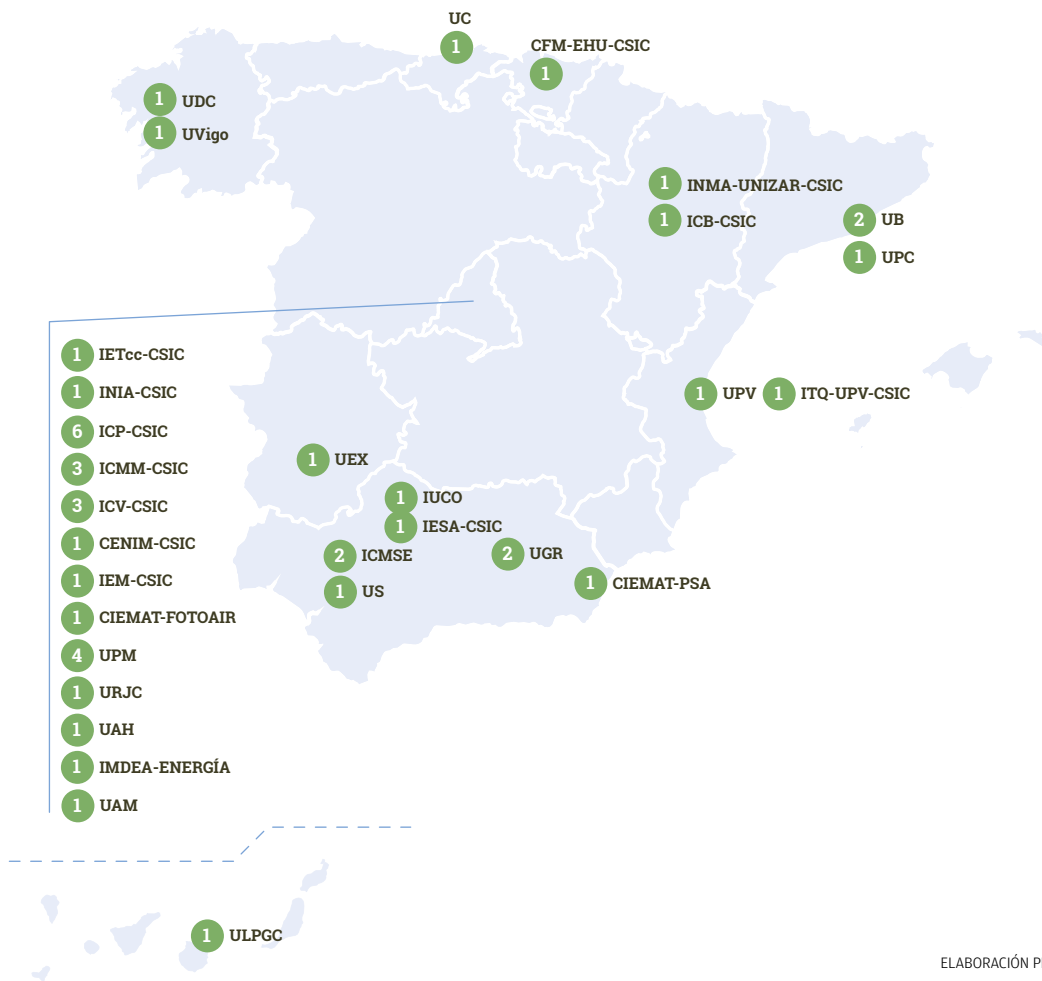


OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE



ELABORACIÓN PROPIA

Figura 9 Número de grupos por centro de investigación integrados en CONEXIÓN FOTOCATALISIS (46 grupos)



ELABORACIÓN PROPIA

El rendimiento de la fotocatalisis depende directamente de los materiales desarrollados y de su respuesta, más o menos eficaz, en presencia de luz. Por ello, el avance en el diseño de nuevos fotocatalizadores es una prioridad del CSIC. El objetivo perseguido es crear materiales más eficientes y sostenibles, especialmente activos bajo luz visible, para aprovechar la energía solar.



Un gran número de investigadores de Conexión Fotocatálisis ha puesto el foco en la creación de una amplia gama de materiales fotocatalíticos avanzados diseñados *ad hoc* para aplicaciones específicas. Entre los desarrollos obtenidos destacan:

- **Nanopartículas y heteroestructuras de óxidos semiconductores**, como el TiO_2 . A partir del óxido de titanio, uno de los catalizadores comerciales más empleados actualmente a nivel mundial, se han desarrollado numerosas innovaciones orientadas a expandir su acción fotocatalítica más allá del rango del ultravioleta (UV), mediante la combinación con otras estructuras o la sustitución parcial por otros elementos, con el objetivo, entre otros, de obtener materiales de bajo coste y alta disponibilidad.
- **Nuevos materiales basados en semiconductores orgánicos** (nanopartículas de carbono, derivados de grafeno, polímeros funcionales, enzimas naturales, biomoléculas o carbones valorizados a partir de residuos) de gran interés como catalizadores auxiliares, fotoelectrodos y sensores.
- **Materiales avanzados** como las MOF (redes metal-orgánicas) y MXenos (nanomateriales bidimensionales estructurados en forma de lámina, fabricados a partir de carburos, nitruros, oxosulfuros o carbonitruros de metales de transición), con propiedades únicas para diversas aplicaciones, como la producción de energía y la lucha contra bacterias resistentes.
- **Procesos sostenibles de fabricación a gran escala**, incluidos recubrimientos funcionales tipo sol-gel o la generación de materiales nanoestructurados a través de microreactores y reactores de pirólisis láser.

Para optimizar su eficiencia, el CSIC cuenta con una amplia red de equipamientos de caracterización avanzados que permiten estudiar la estructura, la superficie y las propiedades ópticas, incluidas las espectroscopías *in situ* y *operando*, así como los análisis de fotofísica a escala atómica. Además, se está explorando el potencial de la inteligencia artificial y el *machine learning* para predecir y acelerar el diseño de nuevos catalizadores mediante la estimación de propiedades químicas y termodinámicas.

22.

Desarrollo de aplicaciones estratégicas de la fotocátalisis en el CSIC

La fotocátalisis permite aprovechar la luz solar para impulsar procesos químicos sostenibles, contribuyendo directamente a la **economía circular, la descarbonización, la calidad del aire y la gestión eficiente del agua y de la energía**. Se trata de una tecnología de alto valor científico-técnico que se alinea plenamente con los grandes desafíos de la sociedad actual en ámbitos como la salud, la protección del medioambiente, la reutilización de recursos y la búsqueda de soluciones energéticas más sostenibles. Este enfoque está plenamente alineado con la Agenda 2030 y con muchos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos en acuerdos multilaterales de amplio consenso mundial.

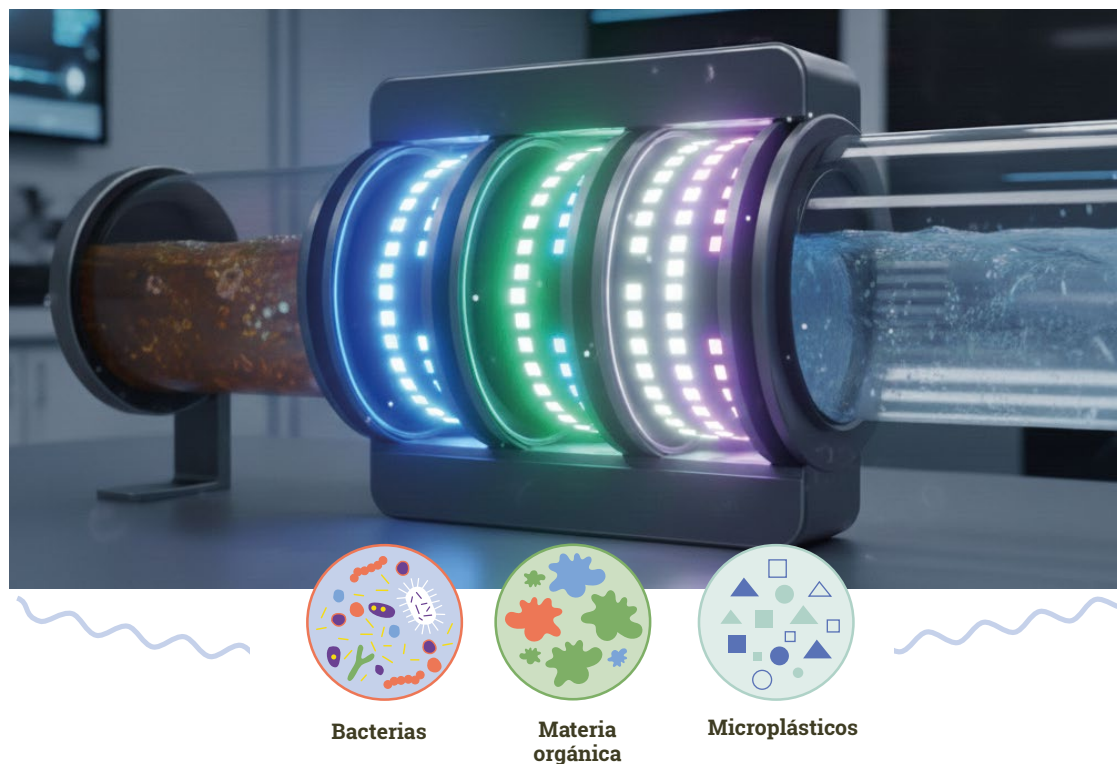
La fotocátalisis como solución a problemas medioambientales

Los distintos equipos de investigación vinculados a Conexión Fotocátalisis del CSIC contribuyen de manera activa al desarrollo de aplicaciones en diversas áreas de impacto medioambiental, especialmente en aspectos relacionados con la descontaminación:

Descontaminación de agua

En los últimos años, la comunidad científica del CSIC y los gestores del ciclo urbano del agua han constatado que los sistemas convencionales de depuración —basados en tratamientos primarios y secundarios con etapas físico-químicas y biológicas— no siempre logran eliminar de forma suficiente un número creciente de sustancias que llegan a las estaciones depuradoras de aguas residuales. El conjunto de contaminantes emergentes estudiados en el contexto de Conexión Fotocátalisis incluye, entre otros, restos de antibióticos y otros fármacos de uso humano y veterinario; moléculas con actividad hormonal capaces de alterar el sistema endocrino; compuestos fluorados persistentes que resisten la degradación natural; colorantes, tensioactivos y fenoles procedentes de diversas industrias; y biocargas microbianas que forma biofilms complejos y albergan genes de resistencia.

Figura 10 Fotocatálisis para la descontaminación de aguas



ELABORACIÓN PROPIA

Los estudios demuestran que su concentración suele ser baja. Aun así, su persistencia, su potencial de bioacumulación y sus efectos biológicos justifican la adopción de políticas de control más ambiciosas, especialmente en escenarios de estrés hídrico donde la reutilización del efluente cobra protagonismo. En este contexto, la fotocatálisis permite incorporar una etapa de oxidación avanzada impulsada por luz, lo que facilita la reducción de compuestos recalcitrantes y la desestructuración de biofilms sin incrementar la carga química del proceso. El CSIC participa en el desarrollo y la optimización de nuevos procesos de oxidación avanzada orientados a mejorar el tratamiento de aguas provenientes de depuradoras urbanas en procesos denominados *terciarios* y *cuaternarios*, que favorecen la degradación de compuestos recalcitrantes y de contaminantes emergentes. Cabe destacar:

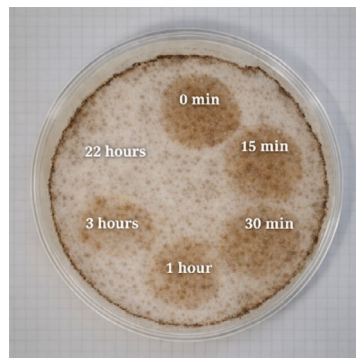
- **Tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales** mediante proyectos e iniciativas que trabajan en la implementación de la fotocatálisis como proceso clave para la eliminación de antibióticos, pesticidas, colorantes y otros disruptores endocrinos.
- **Implementación de fotorreactores** equipados con colectores solares parabólicos y estanques piloto para pruebas de descontaminación de aguas residuales procedentes de entornos urbanos, mediante procesos de electrofotocatálisis y Fenton solar (que combina la reacción ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$) con (H_2O_2) y luz solar para generar radicales hidroxilo).
- **Fabricación de fotocatalizadores a partir de residuos orgánicos o industriales** para favorecer procesos de oxidación Fenton, utilizando luz ultravioleta y agua oxigenada o en combinación con ozono.
- **Control de subproductos de desinfección** en agua potable y monitorización microbiológica antes y después del tratamiento.
- **Eliminación de micro- y nanoplásticos** mediante fotocatálisis.

Descontaminación de aire

La fotocatálisis también contribuye al control de la contaminación ambiental, especialmente en entornos urbanos. La investigación desarrollada por varios grupos del CSIC se centra en procesos de descontaminación y eliminación de óxidos de nitrógeno, procedentes en gran medida de fuentes de emisión móviles, como los vehículos diésel, así como de COVs, presentes tanto en espacios interiores como en exteriores. Ambos tipos de contaminantes se consideran responsables de enfermedades respiratorias, y la fotocatálisis puede actuar, en este caso, como una tecnología de apoyo a otros procesos de filtración.

De forma específica, cabe destacar:

- **El diseño, fabricación y optimización de nuevos materiales que actúan como soportes para fotocatalizadores** (vidrios, cerámicas y pinturas). Como caso particular, no exclusivo de la descontaminación de aire, destaca la autolimpieza, vinculada de forma directa a la aplicación de materiales fotocatalíticos en el sector de la construcción (fachadas, tejas, mobiliario urbano...), especialmente en superficies exteriores, y comparte líneas de investigación con la remediación ambiental, sobre todo en lo relativo a la mejora de la adherencia al soporte y al desarrollo de medidas *in situ*.
- **Tratamientos orientados a mejorar la adherencia** de los fotocatalizadores a estructuras de soporte, con el fin de minimizar el riesgo de inhalación de fotocatalizadores en forma de aerosoles.
- **Tratamiento de gases industriales** (óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y sulfuro de hidrógeno) y reducción de emisiones en fuentes fijas y móviles.
- **Diseño y desarrollo de fotorreactores solares para la descontaminación del aire.**
- **Diseño y desarrollo de sistemas híbridos para espacios interiores.**
- **Diseño y desarrollo de fotorreactores para medidas *in situ*.**



Ensayo de autolimpieza de lixiviado de tabaco a distintos tiempos de irradiación sobre mortero fotocatalítico

Valorización de residuos y economía circular

El CSIC también busca mitigar los efectos adversos derivados de la generación y acumulación de residuos. La gestión de estos residuos será cada vez más restrictiva, de acuerdo con las nuevas normativas europeas que buscan una mayor eficiencia a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos, de modo que el vertedero se reserve como la última alternativa. En este contexto, distintos grupos del CSIC están explorando el potencial de la luz para favorecer procesos fotocatalíticos y fototérmicos asistidos, con

el objetivo de transformar residuos sólidos en productos o combustibles de valor añadido. Cabe destacar el desarrollo de las siguientes líneas de investigación:

- **Reciclaje químico de plásticos** orientado a la obtención de monómeros.
- **Producción de monómeros renovables** a partir de biomasa lignocelulósica.
- **Valorización de biomasa asistida por luz** para la generación de gases de valor añadido, como el hidrógeno.
- **Uso y transformación de residuos** procedentes de la industria siderúrgica o de la agricultura como materiales fotocatalíticos o como soportes y adsorbentes.
- **Producción fotocatalítica de peróxido de hidrógeno** y valorización del amoníaco procedente de la actividad agrícola mediante procesos fotoquímicos y fotoelectroquímicos.

Energía

La fotocatalisis se proyecta como una tecnología clave para la producción de energía sostenible. Además de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, esta tecnología permite revalorizar dichos gases mediante la generación de otros subproductos de valor añadido. En este ámbito, el CSIC está desarrollando numerosos proyectos de investigación centrados en la producción de hidrógeno verde a partir de agua o mediante el reformado de alcoholes; la transformación de dióxido de carbono en hidrocarburos ligeros, metanol o etileno; así como en la obtención de combustibles y productos químicos aprovechando la energía solar. Aunque estas aplicaciones energéticas aún se encuentran en fase de desarrollo, su potencial es muy elevado en el contexto de la transición energética global.



Producción de hidrógeno verde a partir de agua o reformado de alcoholes

La labor del CSIC en la búsqueda de nuevos vectores energéticos basados en la generación de hidrógeno verde se articula en torno a dos rutas complementarias. La primera es la separación de agua asistida por luz mediante fotocátalisis heterogénea y la segunda, la fotoelectrocátalisis (PEC). Se pueden destacar los avances en los siguientes campos:

- **Desarrollo de fotoelectrodos:** incluyendo fotoánodos basados en óxidos semiconductores (por ejemplo, óxidos de vanadio y bismuto, hematita, TiO_2 dopado u óxidos de tungsteno) y fotocátodos compatibles con la evolución de hidrógeno, junto con heterouniones (por ejemplo, nitruro de carbono grafitico, MXenes o polímeros conjugados), orientadas a prolongar la vida útil de los portadores de carga y desplazar la absorción hacia el rango visible. Asimismo, se han desarrollado electrodos híbridos en los que se inmovilizan enzimas o se incorporan cocatalizadores (níquel, cobalto en forma de oxo/hidróxidos o nanopartículas metálicas) que reducen la sobrepotencia, mejoran la selectividad en celdas PEC con membrana y favorecen la separación de productos, un requisito clave desde el punto de vista de la seguridad.
- **Fotoreformado de alcoholes:** el CSIC también es pionero en el reformado fototérmico de alcoholes (mezclas de metanol y vapor de agua, etanol, glicerol u otros bioalcoholes). En esta tecnología se combinan catalizadores fotoactivos (típicamente basados en TiO_2 modificado o sistemas CuOx/TiO_2 , entre otros) con iluminación para reducir barreras energéticas y hacer posible la producción de hidrógeno a partir de alimentaciones líquidas seguras, con balances energéticos y selectividades evaluables y verificables.

El diagrama ilustra el ciclo de producción de hidrógeno renovable. A la izquierda, un círculo azul contiene iconos de un sol y turbinas eólicas, con el texto "Electricidad renovable". Una flecha azul apunta desde este círculo hacia un proceso central etiquetado como "ELECTRÓLISIS". Este proceso se representa como un recipiente con electrodos y burbujas, conectado a una fuente de corriente continua. Una flecha azul sale del electrodo negativo hacia un círculo con el símbolo O_2 , y una flecha verde sale del electrodo positivo hacia un círculo con el símbolo H_2 . A la derecha, un círculo verde muestra la estructura molecular del hidrógeno (H_2), con el texto "Hidrógeno renovable" debajo.

- **Combinación de luz y temperatura:** esta aproximación permite obtener valores de producción de hidrógeno significativamente superiores a los obtenidos mediante fotocatalisis. Así, mediante la termofotocatalisis, es posible lograr un efecto sinérgico entre los procesos termocatalíticos y fotocatalíticos. Se trata de una estrategia novedosa en la que diversos grupos del CSIC trabajan actualmente, lo que los sitúa como referentes a nivel internacional en este campo.

Revalorización del dióxido de carbono en hidrocarburos ligeros, metanol o etileno

La línea de valorización del dióxido de carbono llevada a cabo por el CSIC abarca desde la reducción fotocatalítica hasta la fotoelectrorreducción (CO₂RR), con el objetivo de obtener metanol, etileno e hidrocarburos ligeros que contribuyan a mitigar el impacto de los procesos basados en el ciclo del carbono:

- **Catalizadores avanzados:** en el ámbito de los materiales, los equipos del CSIC exploran catalizadores basados en cobre, óxidos semiconductores (indio, galio), así como plataformas porosas e interfaces híbridas que mejoran la separación de cargas y la adsorción/activación de dióxido de carbono.



- **Desarrollo de reactores y dispositivos:** distintos grupos del CSIC, en colaboración con otras infraestructuras científicas de gran escala, trabajan en el desarrollo e innovación de reactores gas-sólido y celdas PEC con electrodos de difusión de gas (GDE) y membranas iónicas, que permiten mitigar la competencia de la evolución de hidrógeno y aumentar la densidad de corriente parcial del producto. Además, el CSIC avanza en el diseño de planes de integración y armonización de criterios susceptibles de ser evaluados por laboratorios independientes.

Obtención de combustibles y productos químicos mediante energía solar

La tercera línea de acción para la obtención de combustibles y productos químicos solares conecta el desarrollo de materiales con el diseño de dispositivos y reactores.

- **Desarrollo de nuevos reactores:** el CSIC trabaja en el desarrollo de reactores de paso, reactores de lecho fluidizado y lechos fijos de baja pérdida de carga, así como celdas PEC con arquitectura robusta y plataformas fotónicas optimizadas (utilizando iluminación led visible de alta eficacia espectral útil o captadores solares tipo CPC), con especial atención a la seguridad fotobiológica y el control de subproductos.
- **Química solar:** aunque se trata de un campo aún incipiente en el ámbito de la fotocatalisis, el CSIC explora nuevas reacciones más allá de las tradicionalmente empleadas en el tratamiento de aguas. En este marco, se están realizando aproximaciones a reacciones en fase gas que permiten acoplamientos útiles (por ejemplo, oxidaciones selectivas de compuestos orgánicos de interés con generación simultánea de hidrógeno), esquemas fototermocatalíticos que aprovechan simultáneamente luz y calor, y diseños modulares que facilitan el desarrollo de pilotos en entornos relevantes, incluyendo la medición y la verificación de resultados.

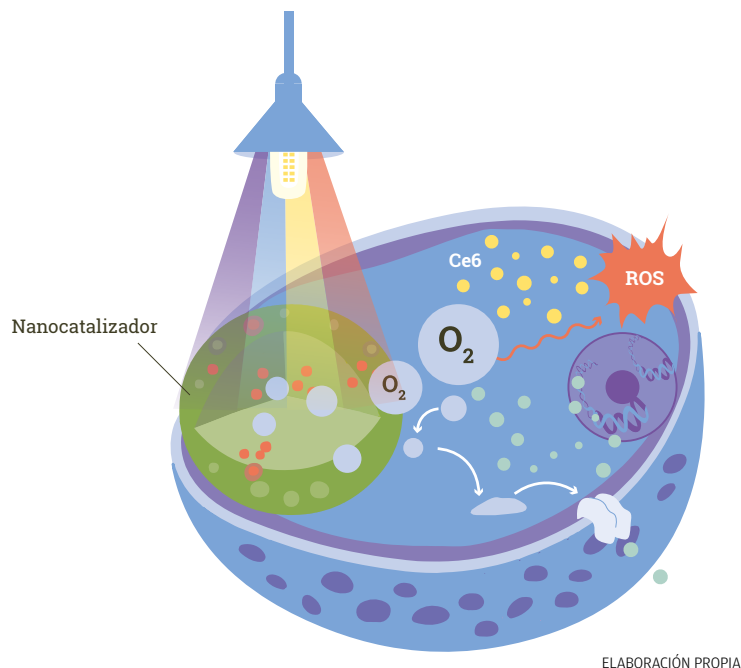
Nuevas aplicaciones de la fotocatalisis en salud y biomedicina

El CSIC viene explorando en los últimos años aplicaciones emergentes de la fotocatalisis en ámbitos relacionados con la salud y la biomedicina:

- **Propiedades biocidas y de desinfección:** se trata de sistemas fotoactivos con propiedades biocidas y tecnologías sostenibles orientadas al tratamiento de contaminantes microbiológicos. En Conexión Fotocatalisis del CSIC existen grupos especializados en la detección y reducción de bioaerosoles en entornos hospitalarios, donde el control de la formación de colonias tiene que incrementarse debido a su creciente bioresistencia a fármacos y productos bactericidas. De forma pionera, se han realizado estudios sobre la eliminación de alérgenos del polen mediante fotocatalisis. Asimismo, distintos miembros del CSIC han colaborado con empresas del sector textil para desarrollar tejidos inteligentes impregnados con fotocatalizadores que reducen la formación de bacterias. En todos los casos, el enfoque del CSIC es considerar la fotocatalisis como una técnica de purificación complementaria a los procesos de ventilación y filtración ya integrados en los protocolos sanitarios.
- **Bioteología:** desarrollo de fotoelectrodos basados en polímeros funcionales, materiales híbridos inorgánico-orgánicos (nanopartículas de oro o magnéticas, nanotubos de carbono, grafeno y puntos cuánticos de carbono) o plataformas de inmovilización de enzimas para el censado de biomoléculas de interés biomédico (glucosa, NADH y glutatión).
- **Diseño de nuevos materiales fotoactivos para aplicaciones terapéuticas:** varios grupos de investigación exploran estrategias de diseño de fotocatalizadores nanoestructurados capaces de generar especies reactivas de oxígeno, convertir metabolitos clave en el entorno microtumoral o activar fár-



Figura 12 Terapia fotodinámica para el tratamiento del microentorno tumoral



macos de forma selectiva, tanto en presencia como en ausencia de luz. En este campo destaca la generación de catalizadores híbridos que mejoran la respuesta en la ventana del infrarrojo cercano, donde se produce una menor interferencia y absorción por parte de los tejidos. Estos incluyen los basados en carbones fotoluminiscentes y materiales plasmónicos a partir de metales nobles. Además, dichos materiales pueden generar, de forma selectiva, otras especies reactivas basadas en metales (como cobre o hierro), que actúan como fotocatalizadores en las células tumorales. No obstante, aún se requiere un mayor número de estudios y el desarrollo de catalizadores que cumplan con todos los requisitos para la translación clínica de la tecnología.

2.3.

Escalado y transferencia

EL CSIC articula la transferencia de desarrollos fotocatalíticos desde el laboratorio hacia la industria mediante una estrategia que combina modelización avanzada, demostración experimental a escala piloto y colaboraciones con infraestructuras nacionales e internacionales.

Modelización, diseño de reactores asistido por inteligencia artificial y herramientas de simulación

El CSIC ha desarrollado iniciativas centradas en la **modelización cinética y de reactores**, integrando metodologías avanzadas para optimizar su comportamiento y acelerar la transferencia tecnológica. Estas herramientas permiten simular la distribución de la irradiancia, el flujo de reactantes, el transporte de masa y la generación de especies activas en sistemas fotocatalíticos, lo cual resulta clave para diseñar fotorreactores eficientes a escala industrial. Los estudios más recientes resaltan la necesidad de integrar el transporte radiativo, que describe **cómo la radiación se propaga, interactúa y transfiere energía** en los distintos medios, la dinámica de fluidos y la cinética de reacción para lograr un diseño robusto. Este enfoque también permite incorporar inteligencia artificial para la predicción del rendimiento, la optimización de parámetros operativos (longitud de onda, intensidad, geometría, tipo de reactor) y la mejora de la reproducibilidad entre laboratorios e instalaciones piloto.

Validación experimental, plantas piloto y prototipos industriales

El escalado industrial exige que los materiales fotocatalíticos no solo presenten una elevada actividad, sino que también posean estabilidad, bajo coste, posibilidad de integración en productos constructivos o sistemas modulares y compatibilidad con las líneas de producción. En este ámbito, diversos grupos del CSIC trabajan en el desarrollo de materiales de tipo MOF, COF, MXenes e híbridos, con mejoras en la absorción de luz visible, menor recombinación de cargas y mayor superficie activa, abordando los retos de integración en fotorreactores reales.



Por otra parte, la transición del laboratorio al mundo industrial exige la puesta en marcha de **plantas piloto** y prototipos funcionales, en las que se evalúan tanto la eficiencia del sistema como su integración en condiciones operativas. En este ámbito, el CSIC ha liderado proyectos como el de degradación fotocatalítica solar de mezclas de pesticidas a escala piloto, o la utilización de pellets TiO_2 caolín a escala semipiloto para el tratamiento de agua como paso previo hacia la aplicabilidad industrial. Otro ejemplo es el uso de materiales de construcción fotocatalíticos evaluados en plataformas piloto urbanas para la eliminación de mezclas de óxidos de nitrógeno y contaminantes de ambientes interiores, con el fin de establecer criterios de conformidad para productos fotocatalíticos y herramientas para la toma de decisiones de escalado. Esta integración entre material y reactor resulta clave para convertir la fotocatalisis en una tecnología competitiva frente a los tratamientos convencionales, al reducir costes, aumentar la durabilidad y asegurar la validación técnica.

Estos desarrollos, en gran medida, se llevan a cabo en colaboración con universidades, otros organismos de investigación e infraestructuras nacionales e internacionales (por ejemplo, la Plataforma Solar de Almería del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) o el Instituto IMDEA Energía), también miembros de la Conexión Fotocatálisis. Estas colaboraciones aseguran la transferencia tecnológica, que se articula tanto a nivel nacional como internacional. Ello es posible gracias a la participación en las principales redes, en programas nacionales y europeos de investigación, desarrollo e innovación –I+D+i– (programas LIFE y Horizon Europe), en organismos normativos tanto nacionales como internacionales, y mediante contratos de investigación y apoyo tecnológico con empresas privadas, que dan lugar a patentes y a la creación de empresas de base tecnológica (*spin off*) y facilitan la llegada de las innovaciones a los sectores productivos estratégicos y de elevado impacto medioambiental y social.



Pese a los avances realizados, existen **barreras** que siguen condicionando la adopción industrial de la fotocatalisis:

- Los costes de producción de materiales e infraestructura especializada.
- La necesidad de estandarizar los métodos de evaluación y establecer protocolos reproducibles entre laboratorios e instalaciones piloto.
- La durabilidad de los fotocatalizadores frente al ensuciamiento, al envenenamiento y a la posible liberación de nanopartículas al agua y en aerosoles.
- El rendimiento reducido bajo irradiación solar real y en geometrías complejas de fotorreactores modulares.
- La necesidad de integración en sistemas existentes y la optimización del ciclo de mantenimiento y regeneración.

La investigación del CSIC está enfocada en superar estos retos mediante la optimización de la síntesis, el diseño modular de reactores, la aplicación de la inteligencia artificial para la predicción del rendimiento y la creación de vías de transición industrial.

tres



Conclusiones y recomendaciones



A partir del análisis de las capacidades científicas, tecnológicas y normativas existentes, esta sección recoge las principales conclusiones del informe y plantea perspectivas y recomendaciones dirigidas a los decisores públicos, las empresas y la sociedad. El propósito es apoyar la definición de estrategias y políticas que aprovechen el potencial de la fotocatalisis como herramienta para la transición ecológica, la mejora ambiental y la protección de la salud pública.

Conclusiones



España dispone de una base científica y tecnológica sólida en el campo de la fotocatalisis, con el CSIC como uno de sus principales ejes vertebradores. El ecosistema de investigación combina excelencia científica, desarrollo tecnológico, transferencia de conocimiento, formación especializada y divulgación de alto impacto. Este tejido, de carácter transversal y multidisciplinar, abarca desde la síntesis y el diseño racional de materiales avanzados hasta la generación de patentes, el desarrollo de reactores innovadores y la validación de tecnologías con potencial de aplicación industrial.



La colaboración entre universidades, centros públicos de investigación, empresas, Administraciones y la sociedad civil se ha consolidado en consorcios y alianzas que impulsan la fotocatalisis española como un ámbito estratégico para la transición ecológica. Esta tecnología se presenta como una herramienta clave para la transformación sostenible de la industria, la gestión ambiental y la producción energética, con capacidad potencial para contribuir a la neutralidad climática y a la mejora de la calidad ambiental.



Este potencial se desarrolla en un contexto normativo europeo y nacional cada vez más ambicioso y restrictivo. La revisión de las directivas sobre calidad del aire, aguas residuales y agua potable, junto con los marcos técnicos en materia sanitaria y de salud ambiental, establece estándares más estrictos y medibles. Ello favorece la adopción de tecnologías fotocatalíticas capaces de ofrecer resultados verificables, medibles y seguros, siempre bajo criterios de sostenibilidad, eficiencia y control riguroso de subproductos y emisiones.



En conjunto, España cuenta con los recursos humanos, científicos e industriales necesarios para situarse en una posición de liderazgo en el desarrollo de tecnologías fotocatalíticas, siempre que se consolide un marco estratégico que conecte la investigación, la innovación y las políticas públicas en torno a objetivos compartidos de sostenibilidad y competitividad. El futuro de la fotocatalisis dependerá de la capacidad para transformar el conocimiento científico acumulado en aplicaciones a gran escala, seguras y económicamente viables. Uno de los principales desafíos es la estandarización de

los métodos de evaluación de los resultados, ya que la falta de protocolos comparables limita la reproducibilidad de los procesos y la validación de los distintos materiales y configuraciones de reactores. En este sentido, el establecimiento de métricas comunes y criterios técnicos armonizados será esencial para avanzar hacia la madurez industrial de la tecnología.

|||||

El desarrollo de nuevos materiales con propiedades mejoradas —capaces de absorber la luz visible, reducir la recombinación de cargas y mantener una alta estabilidad bajo irradiación solar— representa otra línea prioritaria. En los últimos años han surgido materiales emergentes de gran potencial, como los MOF, COF, MXenes y sus combinaciones híbridas, que ofrecen oportunidades para diseñar soluciones a medida. Sin embargo, su aplicación práctica requerirá un conocimiento más profundo sobre su durabilidad, coste de producción y escalabilidad industrial.

|||||

Al respecto, alcanzar un escalado adecuado continúa siendo uno de los principales retos. La transición desde la escala piloto hasta la industrial implica optimizar el diseño de los fotorreactores, reducir los costes operativos y asegurar la sostenibilidad de los procesos. Factores como la baja durabilidad de los catalizadores, la recombinación rápida de excitones o la necesidad de evitar la liberación de nanopartículas al entorno deben abordarse desde una perspectiva integral.

|||||

Por último, la integración de la digitalización, la inteligencia artificial y el aprendizaje automático está llamada a revolucionar el diseño y la evaluación de materiales fotocatalíticos. El uso de modelos predictivos, el cribado computacional de alto rendimiento y los laboratorios automatizados permitirán acelerar el desarrollo de nuevos sistemas y acortar los ciclos de innovación, reforzando la competitividad nacional y europea en este ámbito.



Recomendaciones

Para los decisores públicos:



Diseñar una estrategia nacional de tecnologías fotocatalíticas alineada con los objetivos de transición ecológica, economía circular y neutralidad climática. Esta estrategia debería incluir metas medibles con horizonte 2030, instrumentos de financiación específicos y mecanismos de coordinación entre los ministerios competentes (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITERD], Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades [MICIU], Ministerio de Industria, Comercio y Turismo [MINCOTUR] y Ministerio de Sanidad [MS]).



Impulsar la normalización y estandarización de los métodos de evaluación de la eficiencia fotocatalítica a través de la Asociación Española de Normalización (UNE), en coordinación con los organismos europeos e internacionales (CEN/CENELEC e ISO). La armonización de criterios facilitará la certificación, la comparabilidad de resultados y la adopción de estas tecnologías en la contratación pública verde.



Apoyar el desarrollo de nuevos materiales avanzados —MOF, COF, MXenes e híbridos— mediante programas de I+D orientados a la sostenibilidad, la durabilidad y la escalabilidad industrial, asegurando que las líneas de investigación respondan a las necesidades de sectores estratégicos como el tratamiento de aguas, la calidad del aire urbano, la construcción o la salud ambiental.



Promover proyectos demostrativos y pilotos en entornos reales, que permitan validar el rendimiento de las tecnologías fotocatalíticas a distintas escalas y bajo condiciones operativas representativas. Estos programas deberían incluir mecanismos de seguimiento, evaluación del impacto ambiental y análisis del ciclo de vida, así como la posibilidad de definir políticas de tratamiento alternativas en entornos aislados.



Fomentar la digitalización y el uso de la inteligencia artificial en el diseño, la modelización y la optimización de sistemas fotocatalíticos, impulsando infraestructuras de datos abiertas y laboratorios automatizados para acelerar la innovación.



Desarrollar un marco regulador específico para el uso seguro de nanomateriales y de formulaciones fotocatalíticas, tanto en aplicaciones medioambientales como en sanitarias y clínicas. Este marco debería contemplar protocolos de lixiviación, emisión de aerosoles, irradiación, biodistribución y biodegradación, siguiendo las mejores prácticas internacionales.



Promover estudios normativos y de salud pública que evalúen la eficacia de la fotocatalisis en entornos exteriores e interiores (escuelas, hospitales, oficinas), garantizando la seguridad, la durabilidad y la adecuada integración con los sistemas de ventilación existentes.

Para las empresas:

|||||

Invertir en el desarrollo y la adaptación de tecnologías fotocatalíticas en sectores con alto potencial de impacto: tratamiento de aguas y aire, edificación sostenible, energía renovable, sanidad y movilidad urbana.

|||||

Participar en consorcios público-privados y en programas piloto, aportando conocimiento técnico, materiales y capacidad industrial para validar tecnologías en entornos reales.

|||||

Adoptar estándares de evaluación y certificación reconocidos internacionalmente para aumentar la competitividad y la confianza en los mercados, facilitando la exportación y la homologación de productos.

|||||

Impulsar la innovación responsable en el uso de nanomateriales, garantizando la trazabilidad, la seguridad laboral y la sostenibilidad a lo largo de todo el ciclo de producción.

|||||

Aplicar la inteligencia artificial y el aprendizaje automático para optimizar procesos, reducir los costes de operación y mantenimiento y acelerar el desarrollo de nuevos fotocatalizadores.

|||||

Explorar vías de valorización del dióxido de carbono y de la producción de hidrógeno mediante procesos fotocatalíticos integrados en plantas industriales o energéticas, contribuyendo a la descarbonización de la economía.

|||||

Aprovechar los incentivos fiscales y financieros europeos y nacionales (PERTE, Horizonte Europa, fondos de resiliencia) para invertir en tecnologías limpias y diferenciadoras como la fotocatalisis.



Para la sociedad:



Fomentar la cultura científica y tecnológica en torno a la fotocatalisis, sus beneficios y limitaciones, mediante el desarrollo de programas educativos, de divulgación y de participación ciudadana.



Promover la aceptación social y la confianza en estas tecnologías mediante información transparente y accesible sobre su eficacia, seguridad y contribución a la mejora ambiental y sanitaria.



Apoyar la adopción de soluciones locales basadas en fotocatalisis, especialmente en ciudades y municipios con niveles elevados de contaminación, impulsando su incorporación en planes de sostenibilidad urbana y de calidad del aire.



Favorecer la formación y la capacitación técnica en empleos verdes asociados a la instalación, el mantenimiento y la evaluación de tecnologías fotocatalíticas, con especial atención a jóvenes y a trabajadores en transición profesional.



Integrar la fotocatalisis como herramienta complementaria dentro de un modelo más amplio de sostenibilidad, reconociendo que su eficacia depende de la combinación de políticas estructurales en energía, transporte y urbanismo.

cuatro



Listado de centros del CSIC en la Conexión Fotocatálisis



CENTRO	PÁGINA WEB	CORREO ELECTRÓNICO
Centro de Física de Materiales [CFM, CSIC-UPV/EHU]	cfm.ehu.es/	direccion.cfm@csic.es
Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas [CENIM, CSIC]	www.cenim.csic.es/	direccion.cenim@csic.es
Instituto de Carboquímica [ICB, CSIC]	www.icb.csic.es/	direccion.icb@csic.es
Instituto de Catálisis y Petroleoquímica [ICP, CSIC]	icp.csic.es	direccion.icp@csic.es
Instituto de Cerámica y Vidrio [ICV, CSIC]	www.icv.csic.es/	direccion.icv@csic.es
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja [IETCC, CSIC]	www.ietcc.csic.es/	direccion.ietcc@csic.es
Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid [ICMM, CSIC]	www.icmm.csic.es/	direccion.icmm@csic.es
Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla [ICMS, CSIC-US]	www.icms.us-csic.es	direccion.icms@csic.es
Instituto de Estructura de la Materia [IEM, CSIC]	www.iem.csic.es	direccion.iem@csic.es
Instituto de Estudios Sociales Avanzados [IESA, CSIC]	www.iesa.csic.es	direccion.iesa@csic.es
Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria [INIA, CSIC]	www.inia.es	direccion.inia@csic.es
Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón [INMA, CSIC-UNIZAR]	inma.unizar-csic.es/	direccion.inma@csic.es
Instituto de Tecnología Química [ITQ, CSIC-UPV]	itq.upv-csic.es/	direccion.itq@csic.es

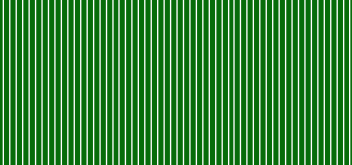
cinco



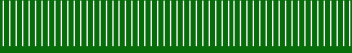
Para saber más



Conexión Fotocatálisis del CSIC



Ciencia para las Políticas Públicas



Informe de transferencia
de conocimiento



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

EDITORIAL
CSIC

SCIENCE  POLICY