

PEROVSKITAS Y FOTOCATÁLISIS: INNOVACIÓN EN EL DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS VERDES PARA AGUA LIMPIA

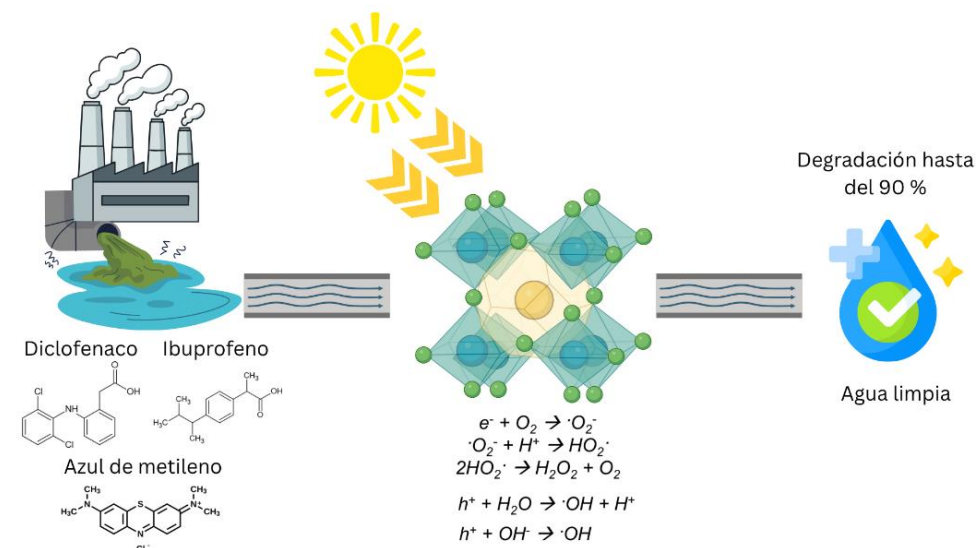
Biología y Química

PEROVSKITES AND PHOTOCATALYSIS: INNOVATION IN THE DEVELOPMENT OF GREEN TECHNOLOGIES FOR CLEAN WATER

Jocabed Abdi Cabrera
Rangel, Sofía Estrada
Flores, Antonia Martínez
Luevanos, Elsa Nadia
Aguilera González

Universidad Autónoma
de Coahuila, Facultad
de Ciencias Químicas,
CA Materiales cerámicos
avanzados y energía.
Blvd. V. Carranza e Ing. J.
Cárdena V., Col.
República, CP 25280,
Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia: Sofía
Estrada Flores, Correo:
s_estrada@uadec.edu.mx;
ORCID: 0000-0003-3499-
1693



RESUMEN

La contaminación del agua por compuestos orgánicos, como colorantes y fármacos, representa un reto creciente para el medio ambiente y la salud humana. Al comparar los distintos métodos de tratamiento de aguas residuales, la fotocatalisis sobresale como una de las alternativas más prometedoras; este proceso aprovecha la energía de la luz para degradar contaminantes en moléculas simples e inocuas. Para lograrlo, es fundamental el desarrollo de semiconductores con propiedades ópticas adecuadas, capaces de

inducir reacciones de oxidación-reducción bajo irradiación. De esta manera, el uso de perovskitas de SrTiO_3 y CaTiO_3 como fotocatalizadores se presenta como una estrategia innovadora, eficiente y sostenible para enfrentar el desafío de los contaminantes emergentes en el agua, contribuyendo al avance hacia tecnologías verdes y resilientes. En este trabajo se presenta el panorama general de los procesos de fotocatálisis y el uso de perovskitas como fotocatalizadores para la remoción de contaminantes de medios acuosos.

Palabras clave: semiconductores; fotocatálisis; perovskitas

ABSTRACT

Water contamination by organic compounds, such as dyes and pharmaceuticals, poses a growing challenge to the environment and human health. When comparing wastewater treatment methods, photocatalysis stands out as one of the most promising alternatives; it harnesses light energy to degrade pollutants into simpler, harmless molecules. To achieve this, the development of semiconductors with suitable optical properties is essential, as they can induce oxidation-reduction reactions under irradiation. In this way, the use of SrTiO_3 and CaTiO_3 perovskites as photocatalysts emerges as an innovative, efficient, and sustainable strategy to address the challenge of emerging water pollutants, contributing to the advancement of green and resilient technologies. This paper provides an overview of photocatalytic processes and the use of perovskites as photocatalysts for contaminant removal from aqueous media.

Keywords: semiconductors; photocatalysis; perovskites

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el tratamiento de las aguas residuales representa uno de los principales desafíos ambientales y sanitarios a nivel global, debido a la complejidad de su composición y al incremento sostenido de los contaminantes químicos y biológicos que comprometen su calidad. El crecimiento demográfico, la intensificación de las actividades industriales y el uso extensivo de productos farmacéuticos, cosméticos y agroquímicos han favorecido la presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos persistentes que,

en muchos casos, no están regulados y presentan propiedades recalcitrantes, tóxicas y bioacumulables. Esta situación ha generado una preocupación creciente, ya que dichos contaminantes, conocidos como emergentes, no son eliminados eficazmente por los tratamientos convencionales, lo que favorece su permanencia y dispersión en los ecosistemas acuáticos (Lee y col., 2021; Salimi y col., 2017).

Las plantas de tratamiento tradicionales, basadas en procesos físicos, químicos y biológicos, han mostrado limitaciones significativas frente a esta nueva generación de contaminantes. Los métodos físicos solo permiten la remoción de sólidos suspendidos, mientras que los procesos químicos y biológicos, aunque más avanzados, pueden producir subproductos tóxicos o presentar baja eficiencia en la degradación de moléculas complejas (Zhao y col., 2018). Además, las tecnologías de oxidación avanzada, como la ozonización o la fotólisis, aunque efectivas, suelen implicar altos costos energéticos y operativos, así como dificultades de aplicación a gran escala.

Frente a este panorama, surge la necesidad de desarrollar alternativas innovadoras y sostenibles que permitan eliminar eficientemente los contaminantes emergentes sin generar impactos secundarios. En este contexto, el diseño de materiales semiconductores con propiedades fotocatalíticas ha cobrado importancia creciente por su capacidad para aprovechar la energía solar para la degradación de compuestos orgánicos persistentes (Pérez-Lucas y col., 2023). Entre estos materiales, las perovskitas destacan por su versatilidad estructural, estabilidad térmica y química, y su potencial para optimizar la absorción de luz visible, características que las posicionan como una opción prometedora en el desarrollo de tecnologías verdes para la producción de agua limpia y segura (Baray-Calderón y col., 2025).

Tratamiento de agua convencional

Los tratamientos convencionales de aguas residuales se basan principalmente en procesos físicos, químicos y biológicos, diseñados para reducir la carga contaminante antes de su vertido o reutilización. En la etapa primaria, se aplican métodos de carácter físico, como el tamizaje, la sedimentación y la decantación, que permiten remover sólidos suspendidos, arenas y materia flotante presentes en el medio.

Sin embargo, estas técnicas resultan insuficientes frente a contaminantes solubles o de naturaleza orgánica compleja, como fármacos, colorantes o compuestos hormonales (Shamshad & Rehman, 2025).

La etapa secundaria incorpora procesos biológicos y químicos, en los que microorganismos o agentes coagulantes facilitan la transformación o precipitación de la materia orgánica disuelta. No obstante, la eficacia de estos métodos depende en gran medida de las condiciones operativas y del tipo de contaminante, y puede incluso generarse subproductos con potencial tóxico. La coagulación-floculación, por ejemplo, es ampliamente utilizada para favorecer la aglomeración de partículas finas, pero requiere un control preciso de la dosificación y la selección de los agentes coagulantes para evitar efectos adversos sobre la calidad del efluente tratado (Chaber-Jarlachowicz y col., 2025; Lucas y col., 2025).

Finalmente, los tratamientos terciarios o avanzados buscan una purificación más profunda mediante procesos de oxidación, adsorción o desinfección. Entre ellos, la ozonización y la fotólisis UV son alternativas eficaces para la degradación de compuestos orgánicos persistentes; sin embargo, su implementación a gran escala se ve limitada por los altos costos energéticos, la formación de subproductos secundarios y la baja selectividad de las reacciones, lo que puede afectar a otros componentes de la matriz acuosa (Zagklis & Bamos, 2022).

Por estas razones, los métodos convencionales, si bien constituyen la base del tratamiento de aguas, no logran responder adecuadamente a la creciente complejidad de los contaminantes emergentes, lo que ha impulsado la búsqueda de nuevos materiales y tecnologías más sostenibles capaces de garantizar una depuración eficiente sin comprometer la integridad ambiental (Oluwole y col., 2020).

Tratamiento por fotocátalisis

En la Figura 1 se presenta un esquema de la eliminación de un contaminante mediante fotocátalisis. En esta reacción, un material semiconductor es activado con luz de energía mayor al valor de su brecha energética prohibida o band gap, por su nombre en inglés, lo



que provoca que en los sitios activos se lleve a cabo la excitación de electrones desde la banda de valencia hacia la banda de conducción, generando pares electrón-hueco. El hueco en la banda de valencia podrá oxidar moléculas de agua para formar radicales hidroxilo ($\text{OH}^\cdot$), por otro lado, en la banda de conducción reduce el oxígeno disuelto para formar especies reactivas como superóxido ($\text{O}_2^\cdot$) siendo estos radicales altamente oxidantes permitiendo la degradación de contaminantes complejos como los colorantes de tipo iónico o fármacos los cuales son persistentes en medios acuosos (Yin y col., 2025).

Durante una reacción fotocatalítica, la eficiencia del proceso puede verse afectada por diversos factores, tanto por las propiedades intrínsecas del semiconductor como por las condiciones experimentales del sistema. En los párrafos siguientes se abordarán las características de los materiales semiconductores que permiten llevar a cabo el proceso de fotocatalisis.

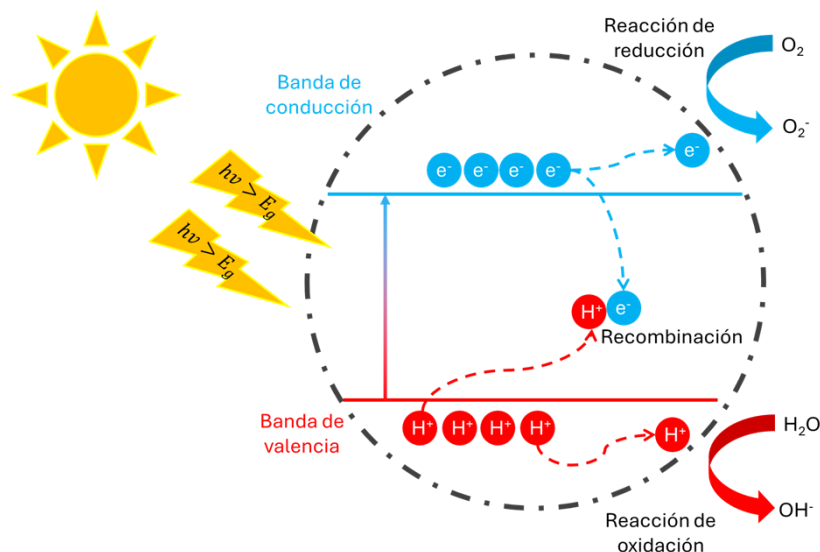


Figura 1. Esquema de activación de la reacción de fotocatalisis.

Materiales semiconductores para tratamiento de aguas residuales

Entre las múltiples aplicaciones de los semiconductores cerámicos, el tratamiento de aguas residuales se ha convertido en una de las más estudiadas. Estas aplicaciones se relacionan con propiedades como la porosidad, la estructura superficial y la presencia de grupos funcionales, que favorecen la adsorción y la transformación de contaminantes en solución acuosa. Ejemplos representativos son los óxidos metálicos TiO_2 y ZnO , así como los compósitos basados en óxido de grafeno, ampliamente utilizados para la eliminación de colorantes sintéticos (Yakout y col., 2025).

Un material semiconductor no conduce electricidad en su estado basal, pero, si es excitado, puede llegar a hacerlo. Los materiales semiconductores poseen una brecha energética prohibida entre 0.5 y 4.5 eV, y sus propiedades ópticas y eléctricas pueden modificarse fácilmente mediante técnicas químicas, como el dopaje o la formación de heteroestructuras (Terna y col., 2021).

Perovskitas

Dentro del grupo de los materiales cerámicos, las perovskitas han despertado un creciente interés científico debido a su versatilidad y al conjunto de propiedades que las hacen útiles en múltiples aplicaciones. Estas incluyen su uso como materiales fotovoltaicos, fotocatalizadores, detectores de radiación X y sistemas de conversión y almacenamiento de energía solar. Su ventaja principal radica en la facilidad de modificar su composición, lo que permite ajustar y potenciar características específicas según la aplicación.

El término perovskita alude a una estructura cristalina con fórmula general ABX_3 , derivada del mineral titanato de calcio (CaTiO_3). En este arreglo, los cationes A y B difieren en tamaño y el sitio X corresponde a un anión, normalmente oxígeno. Gracias a esta estructura, las perovskitas exhiben una notable estabilidad térmica y química, así como propiedades ópticas y electrónicas sobresalientes, entre ellas la alta movilidad de carga, la absorción eficiente en el espectro visible y ultravioleta, y un band gap ajustable. Algunas composiciones presentan, además, propiedades ferroeléctricas, piezoeléctricas y una elevada constante dieléctrica (Gyulavári y col., 2025).



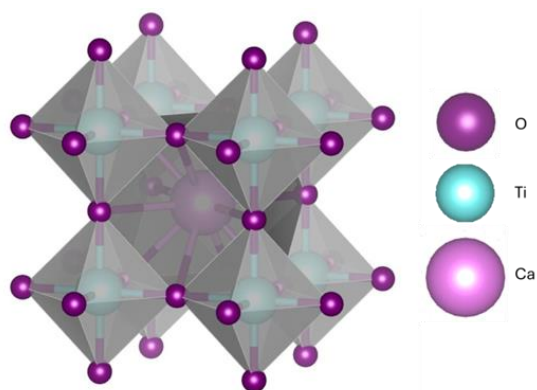


Figura 2. Celda unitaria del CaTiO_3 , un material con estructura tipo perovskita

Existen varios tipos de perovskitas: las inorgánicas y las de tipo hidruro. Entre las perovskitas inorgánicas, predominan las con oxígeno y las basadas en plomo (Pb^{2+}), que presentan alta absorción lumínica tanto en la región visible como en la ultravioleta, lo que las hace idóneas para aplicaciones fotónicas. Además, muestran un transporte eficiente de carga y una elevada estabilidad térmica y química. En este caso, la banda de valencia está constituida principalmente por electrones de valencia, mientras que la banda de conducción proviene de orbitales metálicos del grupo d . Otra variante de esta clase son los óxidos de perovskita con fórmula ABO_3 , que pueden adoptar formas singulares, dobles ($\text{AA}'\text{BB}'\text{O}_{6-\delta}$) o triples ($\text{AA}'\text{A}''\text{BB}'\text{B}''\text{O}_{9-\delta}$). Estos óxidos se emplean como materiales de alta eficiencia en dispositivos de almacenamiento de energía, como supercondensadores y baterías recargables, gracias a su alta densidad de potencia, sus procesos de carga y descarga rápidos y su prolongada vida útil.

Estas cualidades las convierten en materiales altamente competitivos para dispositivos optoelectrónicos, fotovoltaicos y de almacenamiento de energía. En particular, las perovskitas inorgánicas se caracterizan por una estabilidad térmica y química superior a la de sus contrapartes híbridas orgánico-inorgánicas, lo que asegura un funcionamiento más duradero en condiciones ambientales adversas. Asimismo, su capacidad para modular la brecha energética permite emplearla tanto en emisores de luz visible como en materiales

absorbentes para celdas solares de alto rendimiento (Neelakandan y col., 2025).

Por su parte, las perovskitas de hidruro poseen un gran potencial para el almacenamiento de hidrógeno. Su capacidad de absorber y retener este gas de forma eficiente, junto con su estabilidad térmica y su resistencia a la degradación durante ciclos de carga y descarga, los posiciona como alternativas atractivas para sistemas de energía limpia.

Además de estas dos, existen las perovskitas de componentes orgánicos e inorgánicos, que combinan las ventajas de ambos: el bajo costo de los semiconductores orgánicos y la alta eficiencia de los inorgánicos. Se caracterizan por una notable absorción en el rango visible del espectro y por su capacidad de emisión de luz. Por estas razones, se han explorado en aplicaciones optoelectrónicas y en el desarrollo de celdas solares de nueva generación.

Modificación de perovskitas mediante heterouniones

La formación de heteroestructuras es una técnica ampliamente utilizada para optimizar o modificar las propiedades de los materiales semiconductores. Al obtener una heteroestructura, las propiedades no solo pueden potenciarse, sino también combinarse, dando lugar a nuevas sinergias que no se alcanzan en cada componente por separado (Alharbi, 2025). Por ejemplo, en un material que únicamente absorbe luz ultravioleta, la combinación con otros óxidos capaces de absorber en la región visible permite desarrollar un nuevo material que cubra un rango espectral más amplio, mejorando así su eficiencia como fotocatalizador para el tratamiento de contaminantes. Además de ampliar la capacidad de absorción, este tipo de heteroestructuras puede favorecer la separación eficiente de pares electrón-hueco, mejorar la movilidad de carga y aumentar la estabilidad frente a procesos de fotodegradación, factores clave para aplicaciones en energía, medio ambiente y electrónica avanzada (Du y col., 2025). En la Figura 3 observamos el esquema de intercambio de electrones y la formación de huecos en la interfaz entre dos semiconductores distintos.

Sakata y colaboradores (2022) obtuvieron una heterounión de SrTaO_2N y SrTiO_3 en fase única y sin impurezas detectables mediante la síntesis por sol-gel, utilizando geles de óxidos derivados como precursores y urea como agente nitrurante sólido (Sakata y col., 2022).



Zhang y colaboradores (2025) obtuvieron películas de BaTiO_3 , SrTiO_3 con óxido de indio-galio-zinc estas se obtuvieron mediante pulverización catódica por magnetrón con radio frecuencia, resultando en heterouniones con superficies uniformes y buena calidad para su aplicación como transistores de película delgada (TFT) y otras aplicaciones electrónicas (Zhang y col., 2025). Zhang y colaboradores (2024) obtuvieron una heterounión de $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}/\text{SrTiO}_3$ mediante el método de crecimiento epitaxial por deposición por láser pulsado (PLD), obteniendo una heteroestructura bidimensional con aplicaciones electrónicas y optoelectrónicas de alta eficiencia (Zhang y col., 2024). Por otra parte Saijo y colaboradores (2023) obtuvieron una heterounión nanocubos de CaTiO_3 con nanopartículas de TiO_2 para la degradación de azul de metileno bajo irradiación de luz negra (luz UV-A) (Saijo y col., 2023). También Yang y colaboradores (2022) obtuvieron una heterounión de $\text{CaTiO}_3/\text{Cu}/\text{TiO}_2$ mediante síntesis hidrotérmica para la producción fotocatalítica de hidrógeno.

El creciente interés en la formulación de heterouniones basadas en SrTiO_3 y CaTiO_3 con materiales relacionados por su compatibilidad estructural muestra la capacidad de modificar el *band gap* de la heteroestructura optimizando la absorción de luz, favoreciendo la separación de cargas foto inducidas y ampliar la actividad fotocatalítica hacia la región visible permitiendo el desarrollo de materiales más eficientes en la degradación de contaminantes y en aplicaciones de energía sostenible.

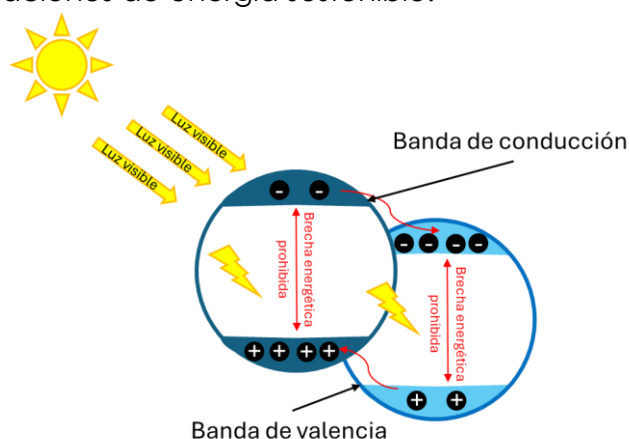


Figura 3. Esquema de una heterounión.

Como se ha observado, las perovskitas se han consolidado como semiconductores prometedores para aplicaciones fotocatalíticas en la eliminación de contaminantes en medios acuosos. La síntesis mediante distintos métodos favorece la formación de heterouniones con materiales complementarios, lo que ha permitido optimizar la transferencia de carga y reducir la combinación electrón-hueco, incrementando así la eficiencia de carga del sistema. La Tabla 1 presenta diferentes composiciones de perovskitas y heterouniones estudiadas para la degradación de ciertas moléculas orgánicas.

Tabla 1. Semiconductores a base de perovskitas para la degradación de contaminantes.

Semiconductor	Método de síntesis	de Contaminante	Porcentaje de remoción
Composito de SrTiO_3 con poliheptazina imida (PHI)	Mecanosíntesis y sinterización en horno tubular.	Colorantes de tipo iónico.	Hasta un 90% de degradación.
SrTiO_3 dopado con manganeso	Sol-Gel con ácido cítrico como agente quelante.	Colorante azul de metileno.	Adsorción máxima de 310.7 mg/g
Composito de nanocubos de CaTiO_3 con Ag_2S	Síntesis hidrotermal.	Colorante rodamina B.	Hasta un 99.6% de degradación.
Composito de CaTiO_3 -OG con deposición de cobre	Síntesis hidrotermal.	Fármaco antibiótico cefixime.	Hasta un 94.1% de degradación.
Nanocubos de CaTiO_3 modificados con CdTe	Síntesis hidrotermal.	Colorante rodamina B	Hasta un 84% de degradación.
SrTiO_3 dopado con tierras raras	Sol-Gel.	Colorante rodamina B	Hasta un 90% de degradación.

CONCLUSIÓN

En este trabajo se plantea el uso de la fotocatalisis heterogénea mediante materiales semiconductores, en particular perovskitas, como una alternativa viable a los tratamientos convencionales de aguas residuales para eliminar moléculas orgánicas complejas, como pesticidas y fármacos. Si bien esta tecnología de oxidación avanzada representa una opción prometedora frente a los contaminantes emergentes, aún enfrenta desafíos asociados a las propiedades intrínsecas de cada material. En este sentido, el diseño racional y la optimización de semiconductores mediante la formación de heterouniones permiten mejorar la separación de cargas fotoinducidas, incrementar la eficiencia bajo luz visible y reducir las limitaciones operativas del proceso. De esta manera, el empleo de perovskitas fotocatalíticas se consolida como una estrategia sostenible y eficiente para el tratamiento de aguas, contribuyendo al desarrollo de tecnologías verdes orientadas a la protección ambiental.

REFERENCIAS

- Alharbi, N. (2025). A bifunctional floral TiO₂-TiB₂ heterostructure buried interface on SnO₂ for 23.5 % efficient n-i-p perovskite solar cells. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 10(3). 100899. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2025.100899>
- Baray-Calderón, A., Aleman-Ramirez, J. L., Díaz-Cruz, E. B., Martinez-Alonso, C., Fuentes-Pérez, M., Olvera-Vargas, H., & Becerra-Paniagua, D. K. (2025). Recent Advances in Perovskite-Based Heterojunction Photocatalysts: Synthesis, Properties, and Applications. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 42(4): 803–826. <https://doi.org/10.1007/s11814-025-00416-1>
- Chaber-Jarlachowicz, P., Gworek, B., & Kalinowski, R. (2025). Removal efficiency of pharmaceuticals during the wastewater treatment process: Emission and environmental risk assessment. *PLOS ONE*, 20(9), e0331211. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0331211>
- Cho, P. P., Mon, P. P., Kumar, M., Duvvuri, S., Madras, G., Chang-Chien, G.-P., Masimukku, S., & Challapalli, S. (2025). Nano-cubic SrTiO₃ on poly(heptazine imide) (PHI) composite for enhancing

- photodegradation efficiency. *RSC Applied Interfaces*. <https://doi.org/10.1039/D5LF00120J>
- Du, S., Yang, W., Hao, W., Liu, T., Hou, M., & Wang, N. (2025). Ordered crystal growth of 2D Ruddlesden–Popper perovskites via synergistic fluorination and chlorination for efficient and stable 2D/3D heterostructure perovskite solar cells. *Chemical Engineering Journal*, 512: 162545. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.162545>
- Gyulavári, T., Abedi, M., Tóth, S., Ágoston, Á., Veréb, G., Bodor, A., Kukovecz, Á., Kónya, Z., Perei, K., & Pap, Z. (2025). Intrinsic and photocatalytic disinfection properties of CaTiO₃, SrTiO₃, and BaTiO₃ alkaline earth metal titanate perovskites. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.07.286>
- Lee, B. C. Y., Lim, F. Y., Loh, W. H., Ong, S. L., & Hu, J. (2021). Emerging Contaminants: An Overview of Recent Trends for Their Treatment and Management Using Light-Driven Processes. *Water*, 13(17): 2340. <https://doi.org/10.3390/w13172340>
- Lucas, M. S., Teixeira, A. R., Jorge, N., & Peres, J. A. (2025). Industrial Wastewater Treatment by Coagulation–Flocculation and Advanced Oxidation Processes: A Review. *Water*, 17(13): 1934. <https://doi.org/10.3390/w17131934>
- Luxová, J., Dohnalová, Ž., Šulcová, P., & Reinders, N. (2025). Mn-doped SrTiO₃ perovskite: Synthesis and characterisation of a visible light-active semiconductor. *Materials Science and Engineering: B*, 313: 117889. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117889>
- Neelakandan, M., Dhandapani, P., Ramasamy, S., Duraisamy, R., Lee, S.J., Angaiah, S. (2025) A review on perovskite oxides and their composites as electrode materials for supercapacitors. *RSC Advances*, 15(21): 16766–16791. <https://doi.org/10.1039/d5ra01950h>
- Oluwole, A. O., Omotola, E. O., & Olatunji, O. S. (2020). Pharmaceuticals and personal care products in water and wastewater: A review of treatment processes and use of photocatalyst immobilized on functionalized carbon in AOP degradation. *BMC Chemistry*, 14(1): 62. <https://doi.org/10.1186/s13065-020-00714-1>
- Passi, M., & Pal, B. (2024). Synthesis and application of Cu-CaTiO₃-GO ternary composite: A new visible-light active multifunctional photocatalyst efficient towards antibiotic cefixime degradation and H₂ evolution reaction. *Environmental Nanotechnology*,



- Monitoring & Management*, 21, 100952.
<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100952>
- Pérez-Lucas, G., Aatik, A. E., Aliste, M., Navarro, G., Fenoll, J., & Navarro, S. (2023). Removal of Contaminants of Emerging Concern from a Wastewater Effluent by Solar-Driven Heterogeneous Photocatalysis: A Case Study of Pharmaceuticals. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(1): 55.
<https://doi.org/10.1007/s11270-023-06075-4>
- Rezaei, M., Heydari-Bafrooei, E., & Ensafi, A. A. (2025). Fabrication of Z-scheme CdTe/CaTiO₃-x perovskite heterostructure with enhanced photocatalytic activity. *Journal of Alloys and Compounds*, 1032: 181214. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.181214>
- Saijo, G., Nguyen, D. T., & Taguchi, K. (2023). Enhancement of photocatalytic activity by Z-scheme heterojunction of CaTiO₃ nanocuboids and P25. *Energy Reports*, 9: 138–143.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.12.116>
- Sakata, T., Yoshiyuki, R., Urushidani, S., Tarutani, N., Katagiri, K., & Inumaru, K. (2022). Ammonia-free synthesis and color tuning of oxynitride perovskite SrTaO₂N-SrTiO₃ solid solution by using alkoxide-derived Ta-Ti binary oxide gel precursors. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 104(3): 685–693.
<https://doi.org/10.1007/s10971-022-05801-4>
- Salimi, M., Esrafil, A., Gholami, M., Jonidi Jafari, A., Rezaei Kalantary, R., Farzadkia, M., Kermani, M., & Sobhi, H. R. (2017). Contaminants of emerging concern: A review of new approach in AOP technologies. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(8): 414. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6097-x>
- Shamshad, J., & Rehman, R. U. (2025). *Innovative approaches to sustainable wastewater treatment: A comprehensive exploration of conventional and emerging technologies*.
<https://doi.org/10.1039/D4VA00136B>
- Song, Y.-X., Ma, W.-Q., Chen, J.-J., Xu, J., Mao, Z.-Y., & Wang, D.-J. (2021). Photocatalytic activity of perovskite SrTiO₃ catalysts doped with variable rare earth ions. *Rare Metals*, 40(5): 1077–1085.
<https://doi.org/10.1007/s12598-020-01674-0>
- Terna, A. D., Elemike, E. E., Mbonu, J. I., Osafire, O. E., & Ezeani, R. O. (2021). The future of semiconductors nanoparticles: Synthesis,



- properties and applications. *Materials Science and Engineering: B*, 272: 115363. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115363>
- Yakout, A. A., Basha, M. T., Al-Raimi, D. S., Aljadaani, A. H., & Ali Zainy, F. M. (2025). Synergistic impact of Cu and MnO₂ nanoparticles in Cu/MnO₂/chitosan/graphene oxide hybrid nanocomposite for improved antibacterial activity and fast adsorption of environmentally relevant anionic and cationic dyes from industrial wastewater. *International Journal of Biological Macromolecules*: 144839. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144839>
- Yan, Y., Yang, H., Yi, Z., Xian, T., Li, R., & Wang, X. (2019). Construction of Ag₂S@CaTiO₃ heterostructure photocatalysts for enhanced photocatalytic degradation of dyes. *Desalination and Water Treatment*, 170, 349–360. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24747>
- Yin, R., Wang, C., Yin, H., Yue, Z., Zhang, C., Ren, H., Dong, S., Li, H., & Wu, Y. (2025). Reflections on the strategy of perovskite ABO₃-type materials in the field of photocatalysis: Focus on titanates and tantalates. *Journal of Alloys and Compounds*, 1037: 182191. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.182191>
- Zagklis, D. P., & Bampos, G. (2022). Tertiary Wastewater Treatment Technologies: A Review of Technical, Economic, and Life Cycle Aspects. *Processes*, 10(11): 2304. <https://doi.org/10.3390/pr10112304>
- Zhang, H., Huang, T., Cao, R., Wang, S., Bo, P., Wu, J., Wang, C., Jia, R., Zhang, Y., Chen, C., & Zhang, H. (2025). Band Offsets in Sputtered BaTiO₃/IGZO and SrTiO₃/IGZO Heterojunctions. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 14(1): 013003. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ada57c>
- Zhang, K., Feng, Y., Hao, L., Mi, J., Du, M., Xu, M., Zhao, Y., Meng, J., & Qiao, L. (2024). In-depth Understanding of the Band Alignment and Interface States Scenario Ultrathin Heterojunction (No. 2408.02182). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.02182>
- Zhao, L., Deng, J., Sun, P., Liu, J., Ji, Y., Nakada, N., Qiao, Z., Tanaka, H., & Yang, Y. (2018). Nanomaterials for treating emerging contaminants in water by adsorption and photocatalysis: Systematic review and bibliometric analysis. *Science of The Total Environment*, 627: 1253–1263. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.006>

- Oluwole, A. O., Omotola, E. O., & Olatunji, O. S. (2020). Pharmaceuticals and personal care products in water and wastewater: A review of treatment processes and use of photocatalyst immobilized on functionalized carbon in AOP degradation. *BMC Chemistry*, 14(1): 62. <https://doi.org/10.1186/s13065-020-00714-1>
- Passi, M., & Pal, B. (2024). Synthesis and application of Cu-CaTiO₃-GO ternary composite: A new visible-light active multifunctional photocatalyst efficient towards antibiotic cefixime degradation and H₂ evolution reaction. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 21, 100952. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100952>
- Pérez-Lucas, G., Aatik, A. E., Aliste, M., Navarro, G., Fenoll, J., & Navarro, S. (2023). Removal of Contaminants of Emerging Concern from a Wastewater Effluent by Solar-Driven Heterogeneous Photocatalysis: A Case Study of Pharmaceuticals. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(1): 55. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06075-4>
- Rezaei, M., Heydari-Bafrooei, E., & Ensafi, A. A. (2025). Fabrication of Z-scheme CdTe/CaTiO₃-x perovskite heterostructure with enhanced photocatalytic activity. *Journal of Alloys and Compounds*, 1032: 181214. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.181214>
- Saijo, G., Nguyen, D. T., & Taguchi, K. (2023). Enhancement of photocatalytic activity by Z-scheme heterojunction of CaTiO₃ nanocuboids and P25. *Energy Reports*, 9: 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.12.116>
- Sakata, T., Yoshiyuki, R., Urushidani, S., Tarutani, N., Katagiri, K., & Inumaru, K. (2022). Ammonia-free synthesis and color tuning of oxynitride perovskite SrTaO₂N-SrTiO₃ solid solution by using alkoxide-derived Ta-Ti binary oxide gel precursors. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 104(3): 685–693. <https://doi.org/10.1007/s10971-022-05801-4>
- Salimi, M., Esrafil, A., Gholami, M., Jonidi Jafari, A., Rezaei Kalantary, R., Farzadkia, M., Kermani, M., & Sobhi, H. R. (2017). Contaminants of emerging concern: A review of new approach in AOP technologies. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(8): 414. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6097-x>



- Shamshad, J., & Rehman, R. U. (2025). *Innovative approaches to sustainable wastewater treatment: A comprehensive exploration of conventional and emerging technologies*. <https://doi.org/10.1039/D4VA00136B>
- Song, Y.-X., Ma, W.-Q., Chen, J.-J., Xu, J., Mao, Z.-Y., & Wang, D.-J. (2021). Photocatalytic activity of perovskite SrTiO₃ catalysts doped with variable rare earth ions. *Rare Metals*, 40(5): 1077–1085. <https://doi.org/10.1007/s12598-020-01674-0>
- Terna, A. D., Elemike, E. E., Mbonu, J. I., Osafire, O. E., & Ezeani, R. O. (2021). The future of semiconductors nanoparticles: Synthesis, properties and applications. *Materials Science and Engineering: B*, 272: 115363. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115363>
- Yakout, A. A., Basha, M. T., Al-Raimi, D. S., Aljadaani, A. H., & Ali Zainy, F. M. (2025). Synergistic impact of Cu and MnO₂ nanoparticles in Cu/MnO₂/chitosan/graphene oxide hybrid nanocomposite for improved antibacterial activity and fast adsorption of environmentally relevant anionic and cationic dyes from industrial wastewater. *International Journal of Biological Macromolecules*: 144839. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144839>
- Yan, Y., Yang, H., Yi, Z., Xian, T., Li, R., & Wang, X. (2019). Construction of Ag₂S@CaTiO₃ heterostructure photocatalysts for enhanced photocatalytic degradation of dyes. *Desalination and Water Treatment*, 170, 349–360. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24747>
- Yin, R., Wang, C., Yin, H., Yue, Z., Zhang, C., Ren, H., Dong, S., Li, H., & Wu, Y. (2025). Reflections on the strategy of perovskite ABO₃-type materials in the field of photocatalysis: Focus on titanates and tantalates. *Journal of Alloys and Compounds*, 1037: 182191. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.182191>
- Zagklis, D. P., & Bamos, G. (2022). Tertiary Wastewater Treatment Technologies: A Review of Technical, Economic, and Life Cycle Aspects. *Processes*, 10(11): 2304. <https://doi.org/10.3390/pr10112304>
- Zhang, H., Huang, T., Cao, R., Wang, S., Bo, P., Wu, J., Wang, C., Jia, R., Zhang, Y., Chen, C., & Zhang, H. (2025). Band Offsets in Sputtered BaTiO₃/IGZO and SrTiO₃/IGZO Heterojunctions. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 14(1): 013003. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ada57c>



- Zhang, K., Feng, Y., Hao, L., Mi, J., Du, M., Xu, M., Zhao, Y., Meng, J., & Qiao, L. (2024). *In-depth Understanding of the Band Alignment and Interface States Scenario Ultrathin Heterojunction* (No. 2408.02182). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.02182>
- Zhao, L., Deng, J., Sun, P., Liu, J., Ji, Y., Nakada, N., Qiao, Z., Tanaka, H., & Yang, Y. (2018). Nanomaterials for treating emerging contaminants in water by adsorption and photocatalysis: Systematic review and bibliometric analysis. *Science of The Total Environment*, 627: 1253–1263. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.006>