

Aplicaciones de metales líquidos para remediación ambiental y recolección de energía

K. Murguía ^a, S. Orozco ^b, J. Espino ^b, M. Rivero ^{a*}

^a Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Morelia, 58190, Michoacán, México

^b Posgrado de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. V1, Ciudad Universitaria, Morelia, 58190, Michoacán, México

ABSTRACT

Gallium-Based Liquid Metals (GBLM) are emerging materials of particular interest because they own properties of metals and fluids, their toxicity is low, and they have high electrical and thermal conductivity. These and other distinctive features enable their usage as a versatile technological framework for sustainable solutions. The focus of this paper is on two main approaches of using GBLM under investigation at the EnviroMetaL Laboratory of the IIM Morelia Unit: environmental remediation and energy harvesting. In water remediation, GBLM have been used to synthesized photocatalysts. Such materials are activated by solar light and can degrade and mineralize emerging pollutants. This application offers a feasible strategy in recycling gallium and its alloys. In turn, two GBLM-based methodologies have been explored in energy harvesting: i) magnetohydrodynamic generators, that benefit from their high electrical conductivity to generate electric currents from the GBLM motion, and ii) GBLMs embedded in elastomers to develop flexible electronic devices able to convert mechanical energy from human motion into electrical energy. Due to their inherent properties, these systems can also be used for strain sensing. Although these materials are highly promising, their implementation faces several challenges, including scalability, control of surface oxidation, and stability. These challenges have motivated new lines of research currently under development at the EnviroMetaL Laboratory.

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Recibido 20 Octubre, 2025

Revisado 05 Diciembre, 2025

Aceptado 30 Diciembre, 2025

KEYWORDS

Liquid Metal, Gallium, Photocatalysis, Energy harvesting, Flexible electronics.

Introducción

Los metales líquidos basados en galio (MLBG) constituyen una clase de materiales emergentes caracterizados por propiedades muy interesantes que surgen de su naturaleza dual como metales y fluidos [1-3]. Estos materiales incluyen al galio puro, así como sus aleaciones, entre las que se pueden mencionar el galio-indio o galio-indio-estaño con diferentes composiciones.

AUTOR DE CORRESPONDENCIA Michel Rivero  mrivero@materiales.unam.mx  Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Morelia, 58190, Michoacán, México. Se puede acceder a los datos complementarios en línea en <https://doi.org/10.71103/ye3hph24>

© 2026 Los autores. Publicado por la Asociación Mexicana en Ciencias en Soldadura, Metalurgia e Ingeniería, A.C. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), que permite la reutilización, distribución y reproducción sin fines comerciales en cualquier medio, siempre que la obra original esté debidamente citada y no sea alterada, transformada o construida de ninguna manera. Los términos en los que se ha publicado este artículo permiten la publicación del Manuscrito Aceptado en un repositorio por parte del autor o con su consentimiento.

Una característica de los MLBG es su bajo punto de fusión (cercano a la temperatura ambiente). Los núcleos metálicos de estos materiales son ricos en electrones, lo que les confiere conductividades eléctrica y térmica altas [4]. Además, presentan una viscosidad baja y fluidez, similares a la del agua, que, aunado a su baja toxicidad, facilita su manipulación en el laboratorio [2]. Una característica fundamental de los MLBG es la formación de una capa superficial de óxido de aproximadamente 0.5 a 3 nm de espesor al ser expuestos a un ambiente con oxidante como el agua o el aire (incluso a concentraciones del orden de ppm). Esta capa de óxidos (referida en algunos casos como “piel”) les brinda estabilidad mecánica y química (pasiva el MLBG) y les permite mantener formas no esféricas, a pesar de su elevada tensión superficial [2]. Estas y otras propiedades son la base de su adaptabilidad en una variedad de aplicaciones emergentes, que abarcan desde la electrónica flexible y la robótica suave hasta remediación ambiental.

En el ámbito de la recolección de energía, los MLBG se han empleado como una opción factible para convertir energía de desperdicio o no aprovechada (como el movimiento del cuerpo humano) en energía eléctrica. Por las condiciones inherentes al tipo de energía, la cantidad que se puede generar suele ser baja, pero permite alimentar dispositivos electrónicos pequeños. Un ejemplo son los generadores magnetohidrodinámicos en los que se aprovecha la alta conductividad de los MLBG, que al estar en movimiento e interactuar con campos magnéticos, se inducen corrientes eléctricas que podemos extraer y aprovechar [5-6]. Otro enfoque que se ha investigado en esta área es el desarrollo de compósitos de metal líquido embebidos en elastómeros que, al igual que en el caso anterior, aprovechan la energía mecánica [7]. Puesto que los elastómeros y fluidos son inherentemente deformables, el compósito resultante tendrá una flexibilidad y capacidad de elongación definidas por el elastómero que soporta al MLBG. Además de la recolección de energía, este sistema puede ser utilizado para la detección de deformaciones. En este caso, una deformación (elongación, flexión, torsión, o una mezcla de ellas) puede inducir un voltaje que podemos asociar con el forzante. Esta característica abre la puerta al desarrollo de dispositivos flexibles para aplicaciones biomédicas.

Por otro lado, se ha investigado el uso de metal líquido como precursor de fotocatalizadores destinados a abordar uno de los problemas más importantes que enfrentamos en la actualidad: la remediación ambiental. Una de las tecnologías que permite la degradación y mineralización de contaminantes recalcitrantes es la fotocatalisis. En este contexto, los óxidos de galio sintetizados a partir de metal líquido tienen propiedades catalíticas y fotocatalíticas [8]. La incorporación de otros elementos permite obtener fotocatalizadores que se activen en el espectro visible [9-12], posibilitando su uso con radiación solar.

La relevancia de los MLBG radica en la combinación única de sus propiedades que permiten, entre otras cosas, la fabricación de componentes electrónicos blandos y flexibles, la conversión de energía mecánica en energía eléctrica y la síntesis de materiales avanzados para la remediación de aguas residuales. A medida que se exploran y optimizan las propiedades de estos materiales, nos damos cuenta de que representan una opción viable para la próxima generación de soluciones tecnológicas sostenibles, aspectos que se están desarrollando en el laboratorio EnviroMetaL [13].

Propiedades fundamentales de los metales líquidos

Los metales líquidos a base de galio se han consolidado como una clase de materiales de gran interés debido a la combinación única de propiedades metálicas y fluidas [1-2, 4]. Desde el punto de vista fisicoquímico, los metales líquidos presentan propiedades extraordinarias que se atribuyen a su estructura electrónica metálica y a la movilidad de sus átomos en estado líquido, lo que les permite responder de manera dinámica y adaptable a diferentes estímulos. A continuación, se mencionan brevemente las propiedades que explican el creciente interés en estos materiales.

Naturaleza metálica - conductividad eléctrica y térmica: el galio y sus aleaciones líquidas mantienen las propiedades electrónicas típicas de los metales sólidos, ya que existen enlaces metálicos entre sus átomos. Los MLBG conservan las características fundamentales de una red de iones positivos rodeada por un “mar de electrones” deslocalizados. Sin embargo, presentan una estructura desordenada. Los electrones deslocalizados y libres pueden moverse a través de la estructura, lo que convierte a los metales líquidos en excelentes conductores de calor y electricidad.

Tensión superficial y reactividad controlable de la superficie: Los MLBG poseen una elevada tensión superficial (más de 10 veces la del agua) por lo que las gotas de metal líquido adoptan una forma esférica estable en diferentes soluciones. Esta propiedad permite manipular el metal líquido mediante electroquímica, incorporación de nanopartículas o funcionalización. Es importante que mencionar que estos materiales forman una capa de óxido en su superficie al ser expuestos al ambiente. Esta capa, de tamaño nanométrico, tiene un efecto pasivante y altera las propiedades del metal líquido, afectando su reactividad y mojabilidad.

Composición típica: Las aleaciones de galio más utilizadas en la literatura son el Galinstan (nombre comercial), una aleación eutéctica no tóxica compuesta de galio-indio-estaño con un punto de fusión de $\sim 11^\circ\text{C}$, y galio-indio eutéctico (o EGaln), una aleación binaria no tóxica con un punto de fusión de alrededor de 15°C . Ambas aleaciones tienen puntos de fusión menores que el del galio puro, 29.76°C [1]. Estabilidad, toxicidad y consideraciones ambientales: Las aleaciones a base de galio se caracterizan por su baja toxicidad y alta estabilidad térmica y química, lo que las convierte en una alternativa segura al mercurio. Las necesidades actuales hacen necesario repensar la manipulación y el reciclaje de estos metales líquidos bajo criterios de sostenibilidad y seguridad ambiental, debido a su creciente importancia tecnológica, así como a la tendencia a la generación de residuos electrónicos.

Aplicaciones en remediación ambiental

En las últimas décadas, el impacto de las actividades humanas sobre los recursos hídricos se ha incrementado. Las principales fuentes de contaminación del agua corresponden a las descargas directas de aguas residuales tratadas y no tratadas de los sectores urbano e industrial sobre los ecosistemas, conduciendo a la presencia de contaminantes emergentes (CE) altamente recalcitrantes en los cuerpos de agua. Los CE incluyen una amplia gama de compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en productos farmacéuticos, de cuidado personal, de limpieza y agroquímicos, entre otros, que podrían representar un riesgo para el medio ambiente y la salud (disruptores endocrinos). Estos contaminantes no son sustancias nuevas, pero no habían sido cuantificados correctamente y no existe regulación para ellos. Por ello, es importante buscar tecnologías que nos permitan degradar y mineralizar este tipo de contaminantes. En este contexto, la fotocatalisis heterogénea representa un proceso eficiente para tales tareas. En el Laboratorio EnviroMetal se están sintetizando, caracterizando y evaluando fotocatalizadores para la degradación y mineralización de diferentes tipos de CE. Este proceso se muestra en la Figura 1. Estos fotocatalizadores se han sintetizado a partir de MLBG utilizando en otras aplicaciones (como se verá más adelante).

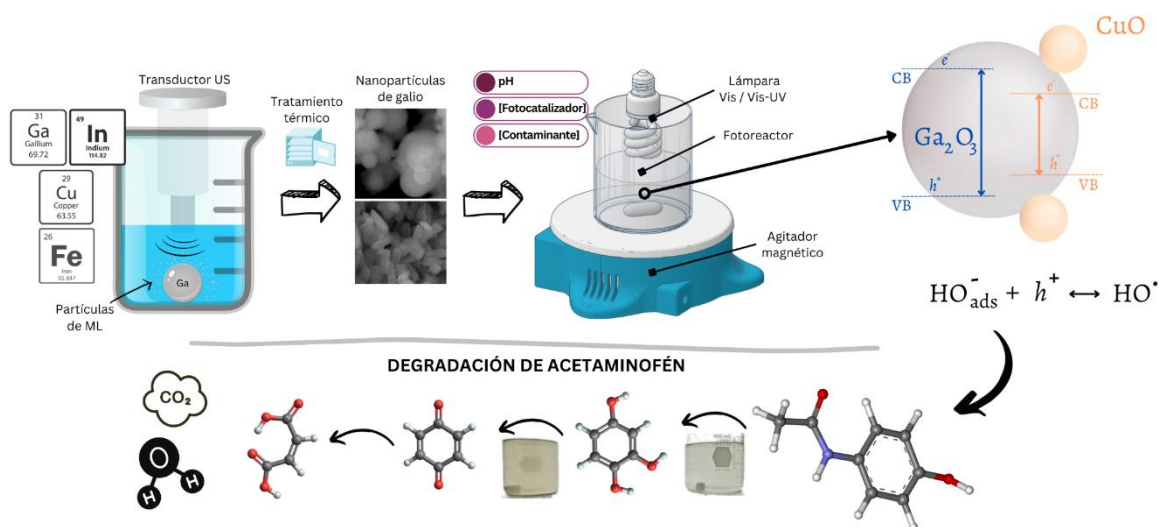


Figura 1. Diagrama general del proceso de síntesis, caracterización y evaluación de nanofotocatalizadores a partir de metal líquido a base de galio. Modificada de [8].

Los MLBG pueden actuar como plantillas o reactores dinámicos para la formación de nanopartículas, óxidos y heteroestructuras con formas y tamaños bien definidos, con propiedades fotocatalíticas. Los óxidos de galio (Ga_2O_3) presentan seis fases cristalinas:

α , β , κ , δ , ϵ , y γ , siendo β - Ga_2O_3 la fase más estable. Este material presenta una banda prohibida amplia (4.6-4.9 eV), característica de un semiconductor. Sin embargo, incorporar elementos dopantes como Cu, Fe, Ag, Mo, Mg, Nb, y Cr modifica su estructura cristalina e influye en sus propiedades ópticas (reduce la banda prohibida), magnéticas, químicas y de transporte. De manera general, estos fotocatalizadores se habían sintetizado a partir de sales de galio. Sin embargo, el creciente uso de los MLBG los posiciona como precursores factibles, lo que implica una ruta viable y sostenible para recuperar y reciclar galio de fuentes como los residuos electrónicos, la electrónica flexible y la robótica suave, entre otras. Es importante mencionar que los métodos de síntesis actuales han tendido a adoptar estrategias más limpias y sostenibles, basadas en los principios de la química verde. Por ejemplo, se han sintetizado fotocatalizadores empleando técnicas de sonicación y transductor ultrasónico [14] [10] lo que reduce el tiempo y rango de temperaturas, y por ende del consumo energético. De igual manera, se han explorado diferentes elementos dopantes [11] [12] para poder utilizarlos con energía solar. Otras líneas de investigación incluyen la formación de heterouniones basadas en galio las cuales requieren menor energía de síntesis o la exploración de nuevas rutas verdes que podrían reducir costos y favorecer la producción a gran escala.

De manera general, la fotocatálisis es una reacción catalítica que ocurre cuando un material semiconductor absorbe luz y genera especies reactivas capaces de degradar compuestos. En la etapa inicial del proceso, la radiación UV o visible aporta fotones con energía que iguala o supera la energía de salto de banda del semiconductor. Esto promueve el salto de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción y deja un hueco positivo. Estos pares electrón-hueco pueden reaccionar con moléculas de agua y oxígeno del medio, produciendo radicales hidroxilo y superóxido (altamente oxidantes) que oxidan o reducen los contaminantes orgánicos e inorgánicos, descomponiéndolos en sustancias más simples e inocuas como bióxido de carbono y agua (ver Figura 1). Con estos materiales se ha logrado una mineralización de acetaminofén y rodamina B de hasta 80% utilizando luz visible durante el tiempo de reacción (5 h) [8] [12]. El uso de fotocatalizadores basada en óxidos de galio poder dar lugar a procesos más limpios y sostenibles. Gracias a las propiedades intrínsecas de los MLBG, se puede manipular mejor la morfología y composición de los materiales, optimizando los procesos de síntesis. Además, reciclar y recuperar estos materiales disminuye los costos y generación de residuos. Sin embargo, estas tecnologías se encuentran en fase de investigación en laboratorio, por lo que se esperan nuevos avances en los próximos años.

Aplicaciones en recolección de energía

El consumo energético asociado al creciente uso de dispositivos electrónicos ha incrementado de forma significativa en los últimos años. Este problema se agrava si consideramos que la recarga, reemplazo y disposición final de las baterías, principal fuente de energía de estos sistemas. Una opción factible para estas problemáticas es la recolección de energía, que es un proceso por el que se convierte energía de fuentes ambientales (térmica, solar, mecánica, vibracional, entre otras que se obtienen en pequeñas cantidades) en energía eléctrica utilizable. Las aplicaciones que requieren una potencia baja (inferior a 1 W) son muy grandes e incluyen una amplia gama de sensores en diferentes ambientes (monitoreo en edificios y fábricas, dispositivos biomédicos adaptables, entre otras). En este contexto, la elevada conductividad, fluidez y capacidad de deformación inherente a los MLBG los hacen candidatos idóneos para estas tecnologías.

Generador magnetohidrodinámico

La magnetohidrodinámica se refiere a la interacción entre campos electromagnéticos y fluidos eléctricamente conductores (como los MLBG), que genera efectos que dependen de la configuración y del sistema. En un generador MHD, un fluido se mueve dentro de un campo magnético externo. Este movimiento relativo induce corrientes eléctricas —normales a ambos campos— que se pueden extraer para alimentar un sistema externo. Entre los fluidos de trabajo, se han investigado metales líquidos, gases ionizados y electrolitos. Entre estos, los generadores basados en MLBG ofrecen ciertas ventajas, como una temperatura de operación baja (cercana a la temperatura ambiente), una mayor conductividad eléctrica, configuraciones de trabajo simples, en algunos casos menor corrosión y menos problemas con los electrodos, entre otras. Se han explorado generadores MHD a base de galio en distintas configuraciones experimentales, incluyendo un generador de vórtices MHD [6] [5] para la recolección de energía del cuerpo humano y generadores en geometrías cartesianas [15] para utilizar la energía de las olas marinas. En la Figura

2 se muestran los componentes principales de un prototipo de generador MHD de tipo vórtice.

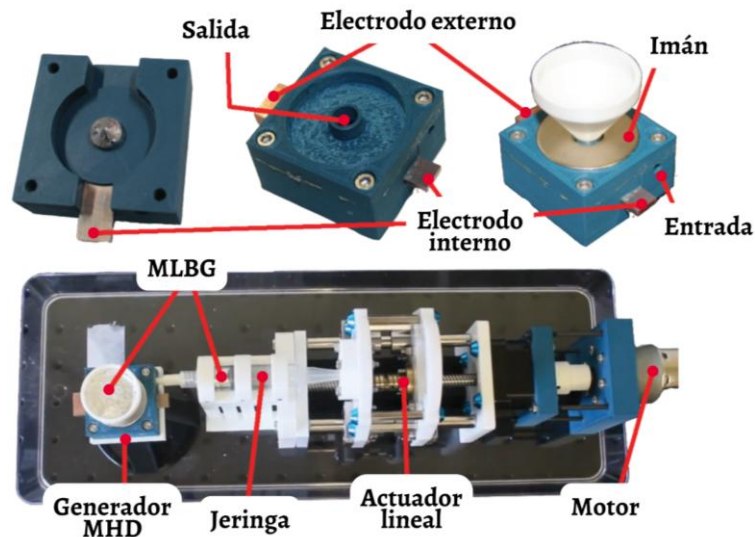


Figura 2. Componentes principales de un generador MHD de tipo vórtice impreso en PLA. Modificado de [6].

Metales líquidos embebidos en elastómeros

Existen otras posibilidades para generar energía mediante MLBG. Una de ellas es embeberlos en matrices poliméricas que les confieren al compuesto estabilidad mecánica. En tal sistema, el polímero proporciona propiedades de estabilidad mecánica, flexibilidad, y adaptabilidad, mientras que el metal líquido contribuye con su excelente conductividad y fluidez. Es decir, se obtiene un compuesto en el que los dos componentes son inherentemente deformables, que lo diferencia de otros enfoques. La incorporación del MLBG en la matriz polimérica se puede lograr en forma de gotas (en escalas submilimétricas, por debajo de la longitud capilar del metal líquido) y/o en forma de bulto (en escalas superiores). Esto se observa en las Figuras 3(c) y 3(a), respectivamente. Esta combinación ofrece ventajas en términos de deformabilidad, adaptación, estabilidad bajo diferentes modos de deformación (tensión, compresión, torsión o una mezcla) e incluso la capacidad de autorreparación en ciertos casos. Estas características dependerán de la matriz polimérica utilizada. Lo anterior abre la posibilidad de innovar en campos como sensores flexibles (ver Figura 3(b)), dispositivos portátiles, pieles electrónicas y generación de energía. Es importante resaltar que la funcionalización de los MLBG (ver Figura 3(d)) es una aplicación emergente que podría llevar al desarrollo de nuevos sistemas y aplicaciones.

Aunque se han tenido avances significativos en la integración de MLBG en la recolección de energía, aún persisten diversos desafíos tecnológicos. Una de las limitaciones más importantes es la oxidación de los MLBG. La formación y el control de la capa de óxido afectan su conductividad, mojabilidad y pasiva al metal líquido. Es importante resaltar que, si bien esta propiedad no es deseada en generación, existen aplicaciones en las que es deseable esta capa [3]. Otro desafío corresponde al encapsulamiento y manipulación del MLBG cuando éste se encuentra embebido en matrices deformables. De igual manera, existen retos en cuanto a la funcionalización de los MLBG, su dispersión en solución, la química interfacial, la biocompatibilidad y la estabilidad, entre otros, que actualmente son objeto de estudio. Los esfuerzos para abordar estos desafíos sin duda impulsarán el desarrollo de nuevas técnicas de microfabricación y compósitos híbridos metal-líquido-polímero orientados a aplicaciones en electrónica flexible, sensores y sistemas de recolección de energía.

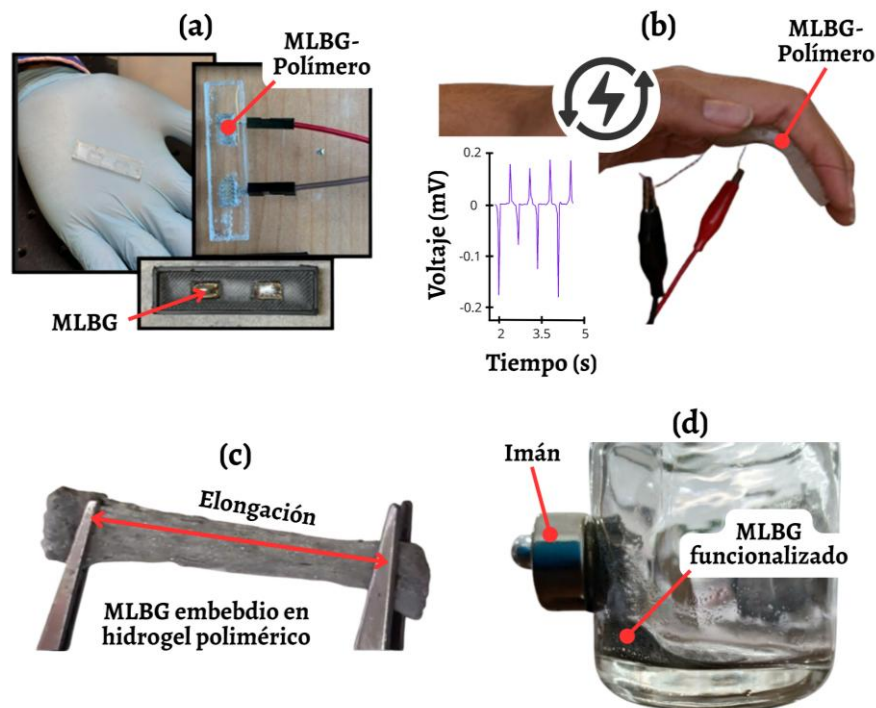


Figura 3. (a) Gotas de metal líquido embebidas en un polímero. (b) Conversión de energía mediante un MLEE para sensado de deformación [7]. (c) Microgotas de MLBG dispersas en un hidrogel polimérico sometido a una elongación de 100%. (d) MLBG funcionalizado para hacerlo magnético.

Conclusiones

Los MLBG han demostrado ser una plataforma tecnológica versátil y con un gran potencial para el desarrollo de sistemas multifuncionales. Las propiedades únicas de estos materiales los posicionan como candidatos ideales para aplicaciones que van desde la recolección de energía hasta la remediación ambiental. Además, el entendimiento y aprovechamiento óptimo de estos materiales permite concebir sistemas más eficientes y sostenibles, contribuyendo a la reducción de residuos electrónicos (ofreciendo una posibilidad para su reusó) y la degradación de contaminantes emergentes, alineándose con los objetivos de sostenibilidad global.

Es importante señalar que las perspectivas en el campo de los MLBG son alentadoras, motivadas por la necesidad de comprender desde una perspectiva fundamental la física y la química subyacentes a estos materiales, así como por el interés en aprovechar sus propiedades para la ingeniería de materiales avanzados. Otra línea de investigación es el desarrollo de nuevos metales líquidos con propiedades adaptadas a aplicaciones específicas, que también se puede lograr mediante la funcionalización de los MLBG existentes. Desde el punto de vista de las aplicaciones, aún existen retos en cuanto a la optimización de los sistemas actuales y a poder llevarlos a dispositivos flexibles y usables.

En el área de fotocatalisis para la remediación ambiental, se espera que la investigación conduzca al desarrollo de procesos escalables, al diseño de reactores fotocatalíticos adecuados, a la inmovilización de los fotocatalizadores, así como a su estabilidad física y química. Asimismo, los estudios deben incluir la degradación de mezclas de contaminantes y de aguas residuales reales. Para los óxidos de galio, se deben explorar las propiedades magnéticas que pueden conferirle ciertos dopantes, como el hierro, lo que ampliaría sus posibles aplicaciones. Finalmente, es importante mencionar el impacto ambiental que tienen los MLBG para cualquier aplicación, lo que requiere de una colaboración interdisciplinaria.

Agradecimientos

K. Murguía agradece a la SECIHTI por la beca de doctorado otorgada (1271561). S. Orozco agradece a la SECIHTI por la Beca de Consolidación M1 y M2 (I1200/320/2022-I1200/331/2023). Los autores agradecen al proyecto UNAM DGAPA PAPIIT IT100925: "Metal líquido a base de galio para recolección y almacenamiento de energía y remediación ambiental".

Declaración de conflicto de interés

Los autores no informaron ningún posible conflicto de intereses relacionado a esta publicación.

Referencias

- [1] T. Daeneke, K. Khoshmanesh, N. Mahmood, J. A. de Castro, D. D. Esrafilzadeh, S. J. Barrow, M. D. Dickey y K. Kalantar-zadeh, «Liquid metals: fundamentals and applications in chemistry,» *Chemical Society Reviews*, vol. 47, pp. 4073-4111, 03 Abril 2018.
- [2] S. Y. Tang, C. Tabor, K. Kalantar-Zadeh y M. D. Dickey, «Gallium Liquid Metal: The Devil's Elixir,» *Annual Review of Materials Research*, vol. 51, pp. 381-408, Julio 2021.
- [3] M. Dickey y M. Rivero, «Metales líquidos: Más allá del Terminator T-1000,» de *Temas Selectos en Ciencia de Materiales y Nanotecnología*, 2022, pp. 196-281.
- [4] S. Afrin, E. Haque, B. Ren y J. Z. Ou, «Liquid elementary metals and alloys: Synthesis, characterization, properties, and applications,» *Applied Materials Today*, vol. 31, p. 101746, 2023.
- [5] R. A. Ávalos-Zúñiga y M. Rivero, «Theoretical modeling of a vortex-type liquid metal MHD generator for energy harvesting applications,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102056, 2022.
- [6] M. Rivero, R. A. Ávalos-Zúñiga y S. Cuevas, «A liquid metal MHD vortex generator for energy harvesting applications,» *Magnetohydrodynamics*, vol. 58, pp. 491-500, 2022.
- [7] K. Murguía, J. Vargas, S. Orozco y M. Rivero, «Electrical response of liquid metal embedded in poly(dimethylsiloxane)/poly(vinyl alcohol),» *Silicon*, p. En revisión, 2025.
- [8] S. Orozco, J. Espino y M. Rivero, «Effect of copper salt on the synthesis of copper-doped gallium metal liquid based photocatalyst (Cu/Ga₂O₃), and its application in acetaminophen photodegradation,» *Catalysis Communications*, vol. 183, p. 106779, 2023.
- [9] S. Orozco, E. Martínez-Aguilar, C. Belver, J. Bedia y M. Rivero, «Simulation and experimentation of iron-doped liquid metal-based gallium oxide photocatalysts for environmental applications harnessing solar energy,» *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 32, p. 12913–12944, 2025.
- [10] K. Murguía, J. Espino, E. Montiel, M. Rivero y S. Orozco, «Photocatalytic Degradation of an Emerging Pollutant with Cu-Doped Gallium-Based Liquid Metal Catalysts, Under Visible Illumination,» *Topics in Catalysis*, vol. 68, p. 1611–1628, 2025.
- [11] S. Orozco, J. Espino, E. Montiel y M. Rivero, «Influence of copper content on the synthesis and application of copper-doped gallium liquid metal-based photocatalyst Cu_x/Ga₂O₃ in acetaminophen photodegradation,» *Materials Letters*, vol. 373, p. 137104, 2024.
- [12] S. Orozco, M. Rivero, E. Montiel y J. Espino, «Gallium Oxides Photocatalysts Doped With Fe Ions for Discoloration of Rhodamine Under UV and Visible Light,» *Frontiers in Environmental Science*, vol. 10, 2022.
- [13] M. Rivero, «EnviroMetaL,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/view/michelrivero/EnviroMetaL>.
- [14] K. Parveen, U. Rafique, M. J. Akhtar y M. Ashokumar, «Ultrasound-assisted synthesis of gallium hybrids for environmental remediation application,» *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 49, pp. 222-232, 2018.
- [15] J. C. Domínguez-Lozoya, D. R. Domínguez-Lozoya, S. Cuevas y R. A. Ávalos Zúñiga, «MHD Generation for Sustainable Development, from Thermal to Wave Energy Conversion: Review,» *Sustainability*, vol. 16, 2024.