



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2026,
Volumen 10, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i4

NANOALEACIONES METÁLICAS DE METALES DE TRANSICIÓN EN APLICACIONES BIOMÉDICAS

**METALLIC TRANSITION METAL NANOALLOYS IN
BIOMEDICAL APPLICATIONS**

Gerardo Trinidad Paredes Quijada
Universidad de Sonora

Rogelio Gámez Corrales
Universidad de Sonora

Jesús Roldán González Martínez
Universidad de Sonora

Felipe Barffuson Domínguez
Universidad de Sonora

Nanoaleaciones Metálicas de Metales de Transición en Aplicaciones Biomédicas

Gerardo Trinidad Paredes Quijada

gerardo.paredes@unison.mx

<https://orcid.org/0000-0003-1950-1959>

Universidad de Sonora

México

Rogelio Gámez Corrales

rogelio.gamez@unison.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3597-7781>

Universidad de Sonora

México

Jesús Roldán González Martínez

jroldan.glezm@outlook.com

<https://orcid.org/0000-0002-3939-5404>

Universidad de Sonora

México

Felipe Barffuson Domínguez

felipe.barffuson@unison.mx

<https://orcid.org/0000-0002-6105-5318>

Universidad de Sonora

México

RESUMEN

Las nanoaleaciones metálicas basadas en metales de transición (Fe, Co, Ni, Cu, Au, Ag, Pt, Pd) han emergido como materiales prometedores en ingeniería de nanomateriales debido a la sinergia que se tiene al combinar propiedades de dos o más nanomateriales. En particular, en el área de biomedicina debido a sus propiedades únicas: actividad catalítica, respuesta magnética, biocompatibilidad y funcionalización superficial. En este trabajo de revisión, se mostrarán algunos de los trabajos de revisión bibliográfica más importantes del área de biomedicina. Los avances más recientes en los últimos años en tres áreas clave: Terapias contra el cáncer (Zhou et al., 2024), Liberación controlada de fármacos (Niu et al., 2022) y Imagen médica (Sun et al., 2024).

Palabras clave: Nanoaleaciones metálicas, metales de transición, biomedicina, liberación de fármacos, imagen médica.

¹ Autor principal.

Correspondencia: gerardo.paredes@unison.mx

Metallic Transition Metal Nanoalloys in Biomedical Applications

ABSTRACT

Metallic nanoalloys based on transition metals (Fe, Co, Ni, Cu, Au, Ag, Pt, Pd) have emerged as promising materials in nanomaterial engineering due to the synergy of combining properties of two or more nanomaterials. In the biomedical research domain, these materials are especially advantageous due to their distinctive characteristics, which encompass catalytic activity, magnetic response, biocompatibility, and surface functionalization. This review paper will present a selection of seminal works in the field of biomedicine. In recent years, significant advancements have been made in three key areas: cancer therapies (Zhou et al., 2024), controlled release (Niu et al., 2022), and targeted delivery (Sun et al., 2024).

Keywords: metal nanoalloys, transition metals, biomedicine, drug delivery, antimicrobials, medical imaging.

*Artículo recibido 20 mayo 2026
Aceptado para publicación: 20 junio 2026*



INTRODUCCIÓN

En la última etapa de la investigación en nanomateriales, las nanoaleaciones compuestas por dos o más metales de transición a escala nanométrica han demostrado una capacidad sinérgica para modificar propiedades físico-químicas con impacto directo en la biomedicina. El uso de estos sistemas híbridos permite ajustes precisos en el diseño de plataformas de liberación controlada de fármacos, capaces de responder a estímulos específicos (pH, temperatura, campos magnéticos, irradiación), lo que aumenta la selectividad terapéutica y reduce los efectos adversos en tejidos sanos.

Las propiedades antimicrobianas y antitumorales se potencian mediante la funcionalización superficial selectiva, lo que permite una orientación precisa hacia células diana y microambientes patológicos. El empleo de nanoaleaciones en imagenología biomédica ha resultado fundamental para incrementar el contraste y la definición de estudios de prediagnósticos, facilitando la integración de herramientas terapéuticas guiadas por imagen, especialmente en oncología. Así, los retos actuales implican el fortalecimiento de la biocompatibilidad, reducción de toxicidad y optimización de protocolos de síntesis y funcionalización para consolidar la transición de estas tecnologías hacia aplicaciones clínicas. La multidisciplinariedad y la evolución hacia sistemas teranósticos (diagnóstico y terapia integrados) son tendencias que definirán los próximos avances en medicina personalizada.

Varias investigaciones recientes han evidenciado que, en función de su composición y funcionalización superficial, las nanoaleaciones pueden actuar tanto para inhibir el crecimiento como para la eliminación de células cancerígenas o microorganismos patógenos al administrarse terapias de manera precisa y localizada. Esto se hace posible al localizar los grupos funcionales en las paredes celulares modificadas (células cancerígenas) usando vibraciones en campos externos para crear hipertermia. La incorporación de nanoaleaciones de metales de transición en sistemas de liberación controlada de fármacos representa una sinergia única entre la física de materiales y la biomedicina. La capacidad para diseñar nanoplataformas que respondan a estímulos específicos abre horizontes en el tratamiento de enfermedades complejas, especialmente en oncología y terapias dirigidas.

El desarrollo de estos sistemas, desde la síntesis de la nanoaleación hasta la evaluación preclínica, requiere un enfoque multidisciplinario colaborativo. La optimización de parámetros fisicoquímicos, el control de la funcionalización superficial y la validación biológica son pasos cruciales para garantizar



una transición segura y eficaz hacia aplicaciones clínicas. La dirección futura apunta a integrar sistemas de diagnóstico con la terapia (teranósticos), lo que podría revolucionar la medicina personalizada.

Nanoaleaciones en Terapias Contra el Cáncer (Hipertermia y Terapia Fototérmica)

Estudios recientes han demostrado el potencial de las nanopartículas bimetálicas en propuestas terapéuticas con impacto en oncología moderna. Las nanopartículas de coordinación bimetálicas Ru/Gd recubiertas con membranas de células cancerosas (Zhou et al., 2024) permiten una localización de tumores de manera biomimética y facilitan la evasión inmunitaria. La nanoplataforma integra terapias fotodinámicas y fototérmicas activadas por luz NIR, junto con capacidades de resonancia magnética para la orientación por imágenes. Las nanopartículas evidencian una estabilidad notable, producción de oxígeno singlete y generación de calor fototérmico, lo que resulta en una ablación tumoral eficaz en ratones con una toxicidad sistémica mínima. Este estudio constituye un ejemplo ilustrativo de la utilidad de las construcciones bimetálicas multifuncionales en el contexto de la oncología teranóstica. En contraste con las investigaciones previas (Niu et al., 2022), las nanopartículas bimetálicas resaltan las características físico-químicas sinérgicas inherentes a los nanomateriales bimetálicos (por ejemplo, aleaciones de Au, Ag, Pt y Cu) respecto a sus homólogos monometálicos. Dichas características incluyen, entre otros aspectos, una notable absorción óptica, una eficiencia catalítica optimizada y una mayor compatibilidad biológica. Los bimetálicos facilitan una mejor conversión fototérmica, la eficacia de la terapia fotodinámica, la administración de fármacos y la radiosensibilización. El progreso en las metodologías de síntesis posibilita la elaboración de diseños minuciosos, maximizando el rendimiento y la bioseguridad. En este sentido, se ha llevado a cabo un examen crítico de los desafíos que plantean la ampliación de escala y la traslación clínica.

Por otro lado, aleaciones como Au-Ag, Pt-Cu y Bi₂S₃-Au han mostrado mejoras en absorción óptica, eficiencia catalítica y compatibilidad biológica respecto a alternativas monometálicas. Su aplicación en hipertermia magnética y fototermia dirigida ha permitido la supresión tumoral y activación de vías inmunitarias, con avances en la personalización de los tratamientos y reducción de resistencia tumoral. Nanoclústeres bimetálicos Bi₂S₃-Au exhiben una notable capacidad para combinar la fluorescencia y la termografía infrarroja, resultando en una eficiente conversión fototérmica activada por NIR. La plataforma en cuestión permite obtener imágenes precisas del tumor y realizar una terapia guiada, con

una eficacia demostrada en la ablación de tumores *in vivo* y con efectos secundarios limitados, lo que subraya su potencial para aplicaciones oncológicas de precisión (Sun et al., 2024). Mientras que en el ámbito de la nanotecnología, diversas nanoestructuras, incluidas las aleaciones bimetálicas, han sido utilizadas como agentes fototérmicos. Se ha puesto de manifiesto que, debido a su mayor absorción del infrarrojo cercano, su eficiencia de conversión fototérmica, su acumulación selectiva en tumores y su baja toxicidad, es posible analizar su uso en terapias combinadas, mostrando su potencial en la traslación clínica y la reducción de la resistencia tumoral (Chen et al., 2023). Mientras, las nanocáscaras huecas de Au-Ag funcionalizadas para atacar tumores HER2 positivos combinan hipertermia local y administración de quimioterapia, lo que induce vías de muerte celular programada y activación inmunitaria. Estos nanosistemas exhiben una supresión tumoral y una respuesta inmunitaria superiores en modelos animales preclínicos, lo que subraya la versatilidad de las nanoplataformas bimetálicas en terapias combinadas (Zhao et al., 2024).

Figura 1. Imagen de pruebas de laboratorio de inyección de nanoaleaciones bimetálicas para tratamiento de hipertermia.



En lo que respecta a los nanomateriales basados en metales, incluidos los bimetálicos, se destaca su relevancia en la administración eficaz de fármacos y la terapia fototérmica. La optimización de la focalización y la administración controlada de fármacos reducen la toxicidad sistémica y mejoran los resultados terapéuticos. La revisión en cuestión aborda los desafíos técnicos inherentes a las aplicaciones clínicas, tales como la ampliación y la seguridad (Kumar & Sharma, 2023). Las propiedades ópticas y

magnéticas mejoradas permiten una localización precisa del tumor y un seguimiento minucioso de la terapia, al tiempo que minimizan la toxicidad, allanando el camino para plataformas teranósticas personalizadas (Paduraru et al., 2022). Asimismo, el desarrollo de nanopartículas bimetalicas de espinela ($\text{Cu}_0, \text{Zn}_0, \text{Fe}_2\text{O}_4$) muestra propiedades eficaces de hipertermia magnética bajo un campo magnético alterno, con una alta compatibilidad biológica y una capacidad de calentamiento eficaz de las células tumorales (Peng et al., 2022). Nanocatalizadores bimetalicos permiten la catálisis bio-ortogonal para el tratamiento específico del cáncer, activando profármacos o generando citotóxicos de forma selectiva en microentornos tumorales, lo que reduce los efectos secundarios y mejora la precisión terapéutica (Wan et al., 2023).

La hipertermia basada en nanopartículas actúa sinérgicamente con la inmunoterapia al inducir el calentamiento localizado del tumor y mejorar el reclutamiento y la memoria de las células inmunitarias [1]. Las nanopartículas bimetalicas han demostrado inducir la regresión sostenida del tumor y la inhibición de la metástasis, lo que sugiere opciones prometedoras en tratamiento mínimamente invasivo. Las nanoaleaciones bimetalicas (Duan et al., 2023) han sido diseñadas con el propósito de optimizar la absorción NIR y la eficiencia de conversión fototérmica, facilitan la apoptosis mediante la generación de ROS (Específicamente, el oxígeno singlete). La optimización estructural y composicional permite maximizar la eficacia terapéutica manteniendo la biocompatibilidad, lo cual es crucial para las aplicaciones prácticas de la terapia fototérmica contra el cáncer (Peng et al., 2022). Estos nanomateriales han demostrado una capacidad notable para mejorar la especificidad tumoral y la eficacia terapéutica combinada, resultando en opciones terapéuticas significativamente más eficaces para los cánceres resistentes (Mariano et al., 2024). Por otra parte, las aleaciones bimetalicas de Sm-Co recubiertas con sílice mesoporosa presentan una doble capacidad magnética y fototérmica para la hipertermia, además de una excelente biocompatibilidad (Liang et al., 2023). Los nanomateriales bimetalicos inducen la ferroptosis, modulan las respuestas inmunitarias y ejercen una toxicidad catalítica específica contra los tumores. Como se ha puesto de manifiesto en investigaciones previas (Lei & Jiang, 2023), las características fisicoquímicas multifuncionales de dichos compuestos mejoran la selectividad anticancerígena y la eficacia terapéutica, lo que los convierte en una tecnología emergente en oncología.

Nanoaleaciones para Liberación Controlada de Fármacos

En el campo de la liberación fármaco-dirigida, las nanoaleaciones bimetálicas han permitido la optimización de sistemas terapéuticos, aumentando la biodisponibilidad y eficacia mientras se reduce la toxicidad sistémica. Plataformas como nanoportadores Au-Ag y Pd-Pt, así como nanoenzimas bio-ortogonales, han sido diseñadas para facilitar la activación localizada de profármacos, logrando tratamientos más controlados y sostenidos en enfermedades inflamatorias y cáncer (Fedeli et al., 2023). Estudios recientes resaltan el papel de la funcionalización superficial y la modulación en tamaño y forma, permitiendo targeting pasivo y activo y una liberación controlada que responde a microambientes tumorales específicos. La integración de nanoaleaciones como agentes antibacterianos y regeneración ósea ha mostrado un perfil de seguridad y eficacia superior frente a alternativas convencionales, lo que amplía el espectro de aplicaciones bioingenieriles.

Las líneas de investigación actuales enfatizan la necesidad de estandarización en métodos de producción, caracterización exhaustiva y evaluación preclínica para garantizar reproducibilidad y calidad en la liberación controlada de fármacos.

Nanopartículas bimetálicas de oro y de plata modificando tamaño, conforman una plataforma para la liberación dirigida, destacando la mejora en la biodisponibilidad de fármacos y la reducción de efectos secundarios [15]. La catalización específica permite la liberación sostenida y evita la toxicidad sistémica. Demuestran eficacia prolongada con baja respuesta hepática adversa in vivo, mostrando un avance hacia la liberación controlada y activación localizada en tumores (Bhol et al., 2020). Se han observado propiedades anticancerígenas, así como capacidades de liberación controlada de nanopartículas metálicas, incluyendo oro, plata (Burlec et al., 2023) y óxidos de hierro. En este sentido, se hace necesario resaltar los mecanismos de targeting pasivo y activo, así como los desafíos relacionados con la toxicidad y biodistribución. Se ha indicado que las nanoaleaciones bimetálicas presentan una mayor estabilidad y multifuncionalidad terapéutica (Hheidari et al., 2024).

Figura 2. Imagen de pruebas de laboratorio de inyección de nanoaleaciones bimetálicas, tratamiento de liberación de fármaco en una rata.



Fuente: Propia

Por otra parte, la presencia de complejos metálicos bimetálicos en nanoportadores (nansustancias transportadoras) mejora la estabilidad del fármaco doxorubicina y previene su liberación espontánea, aumentando la eficacia antibacteriana y reduciendo la toxicidad (Bagherzadeh et al., 2022). Este hallazgo sugiere la posibilidad de diseñar nanoaleaciones con el objetivo de optimizar los perfiles farmacocinéticos de los fármacos antitumorales. Mientras en el ámbito de la investigación científica, se está llevando a cabo un estudio exhaustivo sobre las nanoaleaciones bimetálicas configuradas para terapias combinadas multimodales (Niu et al., 2022). Estas terapias abarcan diversos enfoques, tales como la liberación de fármacos (Szewczyk et al., 2022) (Ramos & Regulacio, 2021), la fototermia y la terapia enzimática, imágenes moleculares para terapia personalizada con alta especificidad. Resultando que las propiedades sinérgicas de los bimetálicos se traducen en una mayor efectividad contra los tumores con una menor toxicidad sistémica, lo que abre el camino a las terapias integradas (Islam et al., 2023).

Es de vital importancia la implementación de un marco global destinado a la estandarización de la nanomedicina, con un enfoque particular en aplicaciones terapéuticas. Este enfoque se centra en la producción controlada y caracterización rigurosa de nanopartículas metálicas, con el propósito de garantizar la calidad, reproducibilidad y seguridad en la liberación controlada de fármacos (Caputo et

al., 2024). Así también, se ha reportado la síntesis controlada de nanoestructuras bimetálicas con características anisotrópicas, las cuales se postulan como catalizadores de reacciones y liberadores de fármacos con alta precisión (Bhol et al., 2020) (Burlec et al., 2023).

Con el objetivo de determinar la eficiencia de las nanoaleaciones en las aplicaciones biomédicas, se ha desarrollado un estudio en la regeneración ósea y las terapias antitumorales. Se destaca la relevancia del uso dual de estas aleaciones como nanoportadores y agentes terapéuticos, lo que permite una administración controlada de fármacos y exhibe propiedades antibacterianas (Liu et al., 2022). La toxicidad reducida y el potencial terapéutico de las nanoaleaciones de metales de transición son posibles al llevar a cabo mediante métodos bioinspirados. Esto permite obtener formulaciones con alta especificidad para la liberación de fármacos en células tumorales, con un buen perfil de seguridad (Nikolova et al., 2023).

Nanoaleaciones en Imagen Médica (MRI, CT, Fototérmica)

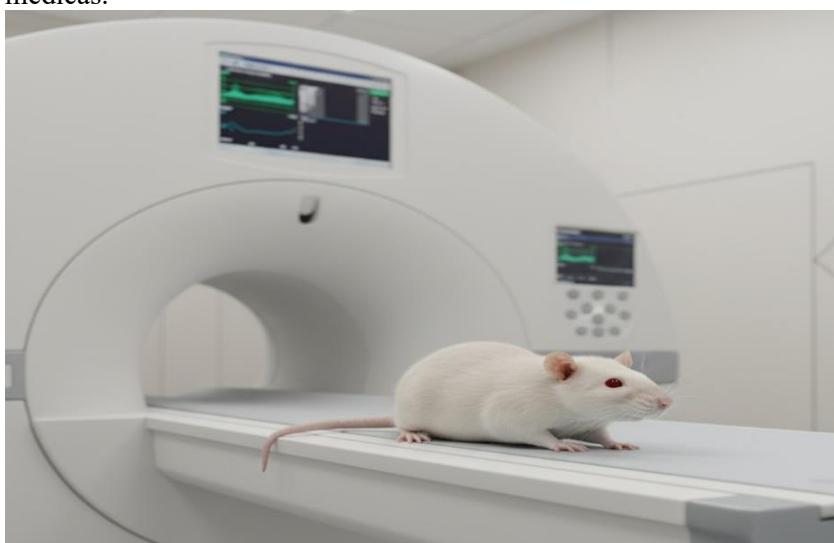
La aplicación de nanoaleaciones bimetálicas en imagen médica ha propiciado mejoras significativas en contraste, sensibilidad y especificidad de los métodos diagnósticos. Nanoplateformas Ru-Gd (Zhou et al., 2024) y Au-Gd (Henderson et al., 2022) han sido desarrolladas para maximizar la capacidad de contraste en MRI y terapia fototérmica guiada, evidenciando alta estabilidad y efectividad en ablación tumoral en modelos preclínicos. Mientras que el diseño de nanozimas catalíticas y nanoclústeres Bi₂S₃-Au ha permitido innovaciones en imagen dual, combinando capacidades de fluorescencia y termografía infrarroja para diagnóstico y monitoreo terapéutico en tiempo real. Nanocompuestos Cu₂MnS₂ y Fe-Au han demostrado óptima respuesta óptica y magnética, facilitando la integración de imagen dual MRI/MSOT y la terapia centrada en el infrarrojo cercano, con bajos niveles de toxicidad y alta eficacia. La síntesis de nanopartículas Janus y la incorporación de elementos magnéticos y fototérmicos han posibilitado la ablación tumoral eficiente y la acumulación específica en lesiones, optimizando el control tumoral y minimizando efectos sistémicos adversos. Estos avances consolidan a las nanoaleaciones como herramientas centrales para el desarrollo de sistemas teranósticos y medicina de precisión.

Mientras que el desarrollo de una nano-plataforma bimetálica Ru-Gd camuflada con membrana celular tumoral para terapia fotodinámica y fototérmica guiada por MRI se ha realizado (Zhou et al., 2024). Los DRu/Gd@CM NPs exhibieron una alta especificidad tumoral, generaron especies reactivas

de oxígeno y fototerapia en concentraciones significativas, y lograron la erradicación tumoral en modelos murinos a los 14 días. La estrategia modular y biomimética ha demostrado su eficacia en la mejora de la circulación, la evasión de la detección inmune y la combinación eficaz del diagnóstico y la terapia.

Por otra parte, se ha reportado el hallazgo de nanozimas bimetalicas Mn-MOFs, que exhiben una actividad de tipo oxidasa (Heidary et al., 2025). Estas nanozimas han sido diseñadas meticulosamente para discriminar y medir antioxidantes de manera simultánea, mediante cambios espectrales colorimétricos. El sensor en cuestión ha demostrado una capacidad de sensibilidad en rangos bajos, lo que lo convierte en un dispositivo de vanguardia para la detección de muestras biológicas. Este avance representa un hito significativo en el campo de los biosensores catalíticos, que se utilizan ampliamente en el ámbito del diagnóstico clínico.

Figura 3. Nanoaleaciones bimetalicas inyectadas a una rata para mejorar la calidad de imágenes médicas.



Fuente: propia

La técnica de imagenología MRI T1 y la terapia fototérmica se han beneficiado del diseño y síntesis de nanocompuestos bimetalicos Au-Gd con geometrías tipo matrioska debido a sus propiedades duales para el contraste (Henderson et al., 2022). En estudios murinos, se observó una alta eficacia en la ablación tumoral y una mejora en la visualización por resonancia magnética, con una buena estabilidad química y biológica.

Así, se han desarrollado síntesis de nanoclústeres bimetálicos de $\text{Bi}_2\text{S}_3\text{-Au}$ para la obtención de imágenes fluorescentes y térmicas infrarrojas, con el propósito de guiar las terapias fototérmicas (Sun et al., 2024). Como se evidencia en las evaluaciones *in vitro* e *in vivo*, se demostró una alta capacidad de ablandamiento tumoral con imagen multimodal de alta resolución para el monitoreo terapéutico. Mientras tanto, la síntesis de nano placas de Cu_2MnS_2 exhibe propiedades ópticas y térmicas que las hacen susceptibles a aplicaciones en terapia fototérmica dentro del rango del infrarrojo cercano (Ke et al., 2017). Además, se ha comprobado que estas nano placas poseen la capacidad de ser utilizadas en combinación con técnicas de imagen dual MRI/MSOT, lo que amplía significativamente su potencial de aplicación en el campo de la medicina y la salud. El sistema exhibió un nivel de toxicidad reducido, una alta fotoconversión y biocompatibilidad, y llevó a cabo una ablación tumoral efectiva en modelos animales. Otra de las nanoestructuras que han sido desarrolladas son nanoesferas bimetálicas Fe-Au, sintetizadas por láser para imagen multimodal *in vivo* (MRI y CT) y terapia fototérmica *in vitro*. La estructura coraza-satélite demostró estabilidad, alta respuesta magnética y fototérmica y capacidad para seguimiento y tratamiento del tumor en modelos murinos. Así mismo, se han desarrollado nanopartículas híbridas biomiméticas, que incorporan elementos magnéticos y fototérmicos, con el propósito de facilitar la terapia térmica guiada por imagen MRI. La administración de la formulación tanto en el ámbito intratumoral como en el extratumoral resultó en una acumulación específica y en un control tumoral efectivo con una mínima toxicidad sistémica (Rocha et al., 2024).

En el ámbito de la nanotecnología médica, se ha investigado el uso de compuestos bimetálicos de $\text{Mn}_3\text{O}_4\text{-Ag}_2\text{S}$ en el diseño de nanopartículas Janus para aplicaciones terapéuticas. Estas nanopartículas, caracterizadas por su versatilidad y potencial, han sido utilizadas en la terapia fototérmica y en la mejora del contraste T1 en resonancia magnética nuclear (MRI), demostrando su eficacia en el campo de la medicina. Se evidencia una producción eficiente de ROS y fototermia NIR con toxicidad baja, así como una validación *in vitro* contra células tumorales (Lu et al., 2023).

El desarrollo de nanoplataformas bimetálicas basadas en nanopartículas de ferrita con carga de oro es otra alternativa, que se postula como una prometedora solución para la imagen multimodal y las terapias combinadas contra el cáncer. Así como también en la optimización del grado de diseminación del tumor, como la disminución volumétrica de magnitud considerable en ensayos efectuados en modelos animales

(Icten et al., 2022). Por otra parte, se han llevado a cabo síntesis de nanocompuestos de FePt para terapia fototérmica e imagen MRI guiada, liberan hierro para tratamiento Fenton y permiten ablación tumoral con imágenes de alta resolución in vivo (Zhang et al., 2017).

CONCLUSIONES

Las nanoaleaciones bimetálicas de metales de transición han demostrado ser tecnologías disruptivas y de alto impacto en la biomedicina contemporánea. Su capacidad para modular propiedades físico-químicas, activar mecanismos específicos y combinar diagnóstico y terapia en plataformas multifuncionales se traduce en avances concretos en oncología, liberación controlada de fármacos e imagen médica. No obstante, la transición hacia aplicaciones clínicas exige una optimización continua de su composición, funcionalización y perfil de seguridad, junto con estudios preclínicos integrales y la implementación de estándares internacionales de calidad. El futuro de este campo se orienta a la consolidación de sistemas integrados de diagnóstico-terapia, apoyados en la personalización de tratamientos y la minimización de efectos adversos en el paciente.

REFERENCIASBIBLIOGRAFICAS

- Bagherzadeh, M., Safarkhani, M., Kiani, M., Radmanesh, F., Daneshgar, H., Ghadiri, A. M., Taghavimandi, F., Fatahi, Y., Safari-Alighiarloo, N., Ahmadi, S., & Rabiee, N. (2022). MIL-125-based nanocarrier decorated with Palladium complex for targeted drug delivery. *Scientific Reports*, 12(Jul 15), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16058-w>
- Bhol, P., Bhavya, M. B., Swain, S., Saxena, M., & Samal, A. K. (2020). Modern Chemical Routes for the Controlled Synthesis of Anisotropic Bimetallic Nanostructures and Their Application in Catalysis. *Frontiers in Chemistry*, 8(357), 01–26. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00357>
- Burlec, A. F., Corciova, A., Boev, M., Batir-marin, D., Mircea, C., Cioanca, O., Danila, G., Danila, M., Bucur, A. F., & Hancianu, M. (2023). Current Overview of Metal Nanoparticles' Synthesis, Characterization, and Biomedical Applications, with a Focus on Silver and Gold Nanoparticles. *Pharmaceuticals*, 16(10), 1410. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ph16101410>
- Caputo, F., Favre, G., Borchard, G., Calzolari, L., Fisicaro, P., & Frejafon, E. (2024). Toward an international standardisation roadmap for nanomedicine. *Drug Delivery and Translational Research*, 14(9), 2578–2588. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13346-024-01646-2>



- Chen, Y., Zhou, F., Wang, C., & Hu, L. (2023). Nanostructures as Photothermal Agents in Tumor Treatment. *Molecules*, 28(1), 277. <https://doi.org/10.3390/molecules28010277>
- Duan, S., Hu, Y., Zhao, Y., Tang, K., Zhang, Z., Liu, Z., Wang, Y., Guo, H., Miao, Y., Du, H., Yang, D., Li, S., & Zhang, J. (2023). Nanomaterials for photothermal cancer therapy. *Royal Society of Chemistry Advances*, 13, 14443–14460. <https://doi.org/10.1039/d3ra02620e>
- Fedeli, S., Huang, R., Oz, Y., Zhang, X., Gupta, A., Gopalakrishnan, S., Makabenta, J. M. V, Lamkin, S., Sanyal, A., Xu, Y., & Rotello, V. M. (2023). Biodegradable Antibacterial Bioorthogonal Polymeric Nanocatalysts Prepared by Flash Nanoprecipitation. *ACS Appl Mater Interfaces*, 15(12), 15260–15268. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c02640>.Biodegradable
- Heidary, O., Ashrafi, H., Akhond, M., & Hemmateenejad, B. (2025). An Array of Manganese-based Bimetallic Metal-Organic- Framework Nanozymes with Enhanced Oxidase-like Catalytic Activity Can Simultaneously Identify and Measure Antioxidants. *ACS Analytical Chemistry*, 97(9), 4860–4870. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.analchem.4c03942>
- Henderson, L., Neumann, O., Kadria-Vili, Y., Gerislioglu, B., Bankson, J., Nordlander, P., & Halas, N. J. (2022). Plasmonic gadolinium oxide nanomaterials: bifunctional magnetic resonance imaging enhancers for photothermal cancer therapy. *PNAS Nexus*, 1(4), 1–6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgac140>
- Hheidari, A., Mohammadi, J., Ghodousi, M., Mahmoodi, M., Ebrahimi, S., Pishbin, E., & Rahdar, A. (2024). Metal-based nanoparticle in cancer treatment: lessons learned and challenges. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12(July), 1–35. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1436297>
- Icten, O., Tuncdemir, B. E., & Mergen, H. (2022). Design and Development of Gold-Loaded and Boron-Attached Multicore Manganese Ferrite Nanoparticles as a Potential Agent in Biomedical Applications. *ACS Omega*, 7(23), 20195–20203. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02074>
- Islam, T., Rahaman, M., Mia, N., Ara, I., Islam, T., Riaz, T. A., Ara, A. C. J., Lima, F. De, Caroline, B., Vasconcelos, G., Andrade, E. M. De, Khan, M. A., Coutinho, H. D. M., Husain, Z., & Islam, M. T. (2023). Therapeutic Perspectives of Metal Nanoformulations. *Drugs and Drug Candidates*, 2(2), 232–278. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ddc2020014>



- Ke, K., Yang, W., Xie, X., Liu, R., Wang, L., Lin, W., Huang, G., & Lu, C.-H. (2017). Copper Manganese Sulfide Nanoplates: A New Two-Dimensional Theranostic Nanoplatfrom for MRI/MSOT Dual-Modal Imaging-Guided Photothermal Therapy in the Second Near-Infrared Window. *Theranostics*, 7(19), 4763–4776. <https://doi.org/https://doi.org/10.7150/thno.21694>
- Kumar, S., & Sharma, A. K. (2023). Metal-based nanomaterials and nanocomposites as promising frontier in cancer chemotherapy. *MedComm*, 4(2), 1–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/mco2.253>
- Lei, H., & Jiang, C. (2023). Recent progress of metal-based nanomaterials with anti-tumor biological effects for enhanced cancer therapy. *Exploration*, 3(April 2022), 01–22. <https://doi.org/10.1002/EXP.20220001>
- Liang, X., Xu, W., Li, S., Kurboniyon, M. S., Huang, K., Xu, G., Wei, W., Ning, S., & Wang, C. (2023). Tailoring mSiO₂-SmCox nanoplatfroms for magnetic/photothermal effect-induced hyperthermia therapy. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11(July), 01–11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1249775>
- Liu, Y., Xu, Z., Qiao, M., Cai, H., & Zhu, Z. (2022). Metal-based nano-delivery platform for treating bone disease and regeneration. *Frontiers in Chemistry*, 10(August 9), 01–22. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.955993>
- Lu, Y., Wu, Y., Tang, Z., Hou, Y., Cui, M., Huang, S., Long, B., Yu, Z., Iqbal, M. Z., & Kong, X. (2023). Synthesis of Multifunctional Mn₃O₄-Ag₂S Janus Nanoparticles for Enhanced T₁-Magnetic Resonance Imaging and Photo-Induced Tumor Therapy. *Sensors*, 23(21), 8930. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s23218930>
- Mariano, S., Carata, E., Calcagnile, L., & Panzarini, E. (2024). Recent Advances in Photodynamic Therapy: Metal-Based Nanoparticles as Tools to Improve Cancer Therapy. *Pharmaceutics*, 16(7), 932. <https://doi.org/doi.org/10.3390/pharmaceutics16070932>
- Nikolova, M. P., Joshi, P. B., & Chavali, M. S. (2023). Updates on Biogenic Metallic and Metal Oxide Nanoparticles: Therapy, Drug Delivery and Cytotoxicity. *Pharmaceutics*, 15(6:1650), 01–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15061650>



- Niu, G., Gao, F., Wang, Y., Zhang, J., Zhao, L., & Jiang, Y. (2022). Bimetallic Nanomaterials: A Promising Nanoplatfrom for Multimodal Cancer Therapy. *Molecules*, 27(24), 8712. <https://doi.org/doi.org/10.3390/molecules27248712>
- Paduraru, D. N., Ion, D., Niculescu, A., Musat, F., Andronic, O., Grumezescu, A. M., & Bolocan, A. (2022). Recent Developments in Metallic Nanomaterials for Cancer Therapy, Diagnosing and Imaging Applications. *Pharmaceutics*, 14, 435. <https://doi.org/doi.org/10.3390/pharmaceutics14020435>
- Peng, Q., Qian, Z., Gao, H., & Zhang, K. (2022). Recent Advances in Transition-Metal Based Nanomaterials for Noninvasive Oncology Thermal Ablation and Imaging Diagnosis. *Frontiers in Chemistry*, 10(April), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.899321>
- Ramos, R. M. C. R., & Regulacio, M. D. (2021). Controllable Synthesis of Bimetallic Nanostructures Using Biogenic Reagents: A Green Perspective. *ACS Omega*, 6(11), 7212–7228. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00692>
- Rocha, V. R., Krause, R. F., Ribeiro, C. E., Oliveira, D. A., Sousa, L. R. De, Santos, J. L., Castro, S. D. M., Valadares, M. C., Cunha, M., Pinto, X., Pavam, M. V., Mendanha, A., & Bakuzis, A. F. (2024). Near Infrared Biomimetic Hybrid Magnetic Nanocarrier for MRI- Guided Thermal Therapy. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17(9), 13094–13110. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03434>
- Sun, H., Cao, Y., Zhai, B., Zhao, X., Zhang, X., & Su, J. (2024). Multifunctional Bi₂S₃-Au nanoclusters for fluorescence/infrared thermal imaging guided photothermal therapy. *International Journal of Pharmaceutics: X*, 8(September), 100286. <https://doi.org/10.1016/j.ijpx.2024.100286>
- Szewczyk, O. K., Roszczenko, P., Czarnomysy, R., Bielawska, A., & Bielawski, K. (2022). An Overview of the Importance of Transition-Metal Nanoparticles in Cancer Research. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(12), 6688. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijms23126688>
- Wan, X., Zhang, Y., Nie, Y., Zhang, K., Jin, Z., Zhang, Z., Gan, L., Liu, X., & He, J. (2023). A narrative review: progress in transition metal-mediated bioorthogonal catalysis for the treatment of solid tumors. *Translational Cancer Research*, 12(8), 2181–2196. <https://doi.org/10.21037/tcr-23-345>

- Zhang, R., Cheng, K., Antaris, A. L., Ma, X., Yang, M., Ramakrishnan, S., Liu, G., Lu, A., Dai, H., Tian, M., & Cheng, Z. (2017). Hybrid Anisotropic Nanostructures for Dual-modal Cancer Imaging and Image-guided Chemo-thermo Therapies. *Biomaterials*, 103, 265–277. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2016.06.063>.Hybrid
- Zhao, L., Chang, F., Tong, Y., Yin, J., Xu, J., Li, H., & Du, L. (2024). A Multifunctional Bimetallic Nanoplatfrom for Synergic Local Hyperthermia and Chemotherapy Targeting HER2-Positive Breast Cancer. *Advance Science*, 11(16), 2308316. <https://doi.org/10.1002/advs.202308316>
- Zhou, M., Wang, Y., Xia, Y., Li, Y., Bao, J., Zhang, Y., Cheng, J., & Shi, Y. (2024). MRI-guided cell membrane-camouflaged bimetallic coordination nanoplatfrom for combined tumor phototherapy. *Materials Today Bio*, 26(December 2023), 101019. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2024.101019>