

EL LADO VERDE DE LAS NANOESTRUCTURAS DE BISMUTO: REVOLUCIONANDO LA NANOTECNOLOGÍA CON MÉTODOS SOSTENIBLES

THE GREEN SIDE OF BISMUTH NANOSTRUCTURES: REVOLUTIONIZING NANOTECHNOLOGY THROUGH SUSTAINABLE METHODS

DE LOS SANTOS TORRES, Aarón ¹

MARTÍNEZ LANDEROS, Víctor Hugo ¹

GARCÍA CERDA, Luis Alfonso ²

RESUMEN

La creciente demanda de nanomateriales más seguros y sostenibles ha posicionado a la síntesis verde como una opción viable frente a los métodos convencionales, que a menudo emplean reactivos tóxicos y demandan alto consumo energético. En este contexto, las nanoestructuras de bismuto han cobrado relevancia debido a su baja toxicidad, propiedades semiconductoras y versatilidad aplicativa. Esta revisión analiza los avances recientes en la síntesis de nanoestructuras de bismuto mediada por agentes biológicos, como extractos vegetales, microorganismos y biomoléculas, así como su caracterización morfológica, propiedades funcionales y desempeño en aplicaciones ambientales, particularmente en fotocatalisis y remediación ambiental. Entre los hallazgos reportados, destaca que un método verde permite obtener nanopartículas con morfologías controladas y buena biocompatibilidad, aunque aún enfrentan limitaciones en reproducibilidad y escalabilidad. Se concluye que, pese a los retos pendientes, la síntesis verde de nanoestructuras basadas en bismuto constituye una alternativa prometedora para el desarrollo de nanomateriales sostenibles, siempre que se avance en la estandarización de protocolos y la validación en condiciones reales.

Palabras clave: nanoestructuras de bismuto; síntesis verde; fotocatalisis; sostenibilidad; remediación ambiental.

1. Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila, Monclova, Coahuila, México.
2. Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia
vmartinezlanderos@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0001-5881-4048>
Fecha de recepción
30 de octubre de 2025.
Fecha de aceptación
17 de febrero de 2026.

ABSTRACT

The growing demand for safer and more sustainable nanomaterials has positioned green synthesis as a viable alternative to conventional methods, which often involve toxic reagents and high energy consumption. In this context, bismuth nanostructures have gained relevance due to their low toxicity, semiconductor properties, and application versatility. This review analyzes recent advances in the synthesis of bismuth nanostructures mediated by biological agents—such as plant extracts, microorganisms, and biomolecules—as well as their morphological characterization, functional properties, and performance in environmental applications, particularly in photocatalysis and remediation. Among the reported findings, it stands out that these green methods enable the production of nanoparticles with controlled morphologies and greater biocompatibility, although they still face limitations in reproducibility and scalability. It is concluded that, despite pending challenges, the green synthesis of bismuth represents a promising alternative for the development of sustainable nanomaterials, provided progress is made in protocol standardization and validation under real conditions.

Keywords: *bismuth nanostructures; green synthesis; photocatalysis; sustainability; environmental remediation.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la síntesis de nanomateriales se ha orientado hacia rutas más sostenibles, en respuesta a los impactos ambientales asociados a los métodos químicos y físicos convencionales (Gupta, 2023). La denominada síntesis verde utiliza recursos naturales, desde extractos vegetales hasta residuos agroindustriales, como agentes reductores y estabilizantes, lo que reduce significativamente el uso de solventes orgánicos peligrosos y el consumo energético (Nasrollahzadeh y col., 2018; Makarov y col., 2014).

De los metales estudiados, el bismuto ha despertado especial interés por su baja toxicidad, estabilidad química y propiedades optoelectrónicas únicas, que lo hacen adecuado para aplicaciones que van desde la catálisis hasta la biomedicina (Shahbazi y col., 2020; Batool y col., 2021). El uso de extractos

de plantas para la síntesis de nanomateriales permite no solo la reducción de precursores de bismuto, sino también el control sobre la forma y el tamaño de las nanopartículas, algo difícil de lograr con métodos tradicionales sin recurrir a surfactantes agresivos.

No obstante, la síntesis verde de nanoestructuras de bismuto (Bi-NS) aún enfrenta obstáculos considerables. La variabilidad en la composición de los extractos biológicos, la falta de estandarización de los protocolos y la dificultad para escalar los procesos son algunos de los problemas más frecuentemente reportados (Mofijur y col., 2022; Gupta, 2023). Además, existen vacíos importantes en la comprensión de los mecanismos moleculares que subyacen a la biorreducción y a la estabilización coloidal, lo que limita la reproducibilidad entre lotes.

El objetivo de esta revisión es ofrecer una visión integral y actualizada de las estrategias de síntesis verde de nanoestructuras de bismuto, así como de los factores que influyen en sus propiedades fisicoquímicas y sus aplicaciones ambientales, destacando los desafíos de implementación y las oportunidades de investigación futura.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente revisión bibliográfica se llevó a cabo mediante una búsqueda sistemática de literatura científica en bases de datos especializadas, incluyendo Scopus, Web of Science y ScienceDirect. Se consideraron artículos publicados principalmente entre 2020 y 2025, enfocados en la síntesis verde de nanoestructuras de bismuto, con énfasis en los mecanismos de síntesis, la caracterización fisicoquímica y las aplicaciones ambientales, particularmente en procesos de fotocatalisis y remediación.

Los criterios de selección incluyeron estudios originales y revisiones que abordaran rutas de síntesis mediadas por agentes biológicos, métodos asistidos por tecnologías verdes y evaluaciones del desempeño funcional de las nanoestructuras obtenidas. La información recopilada fue analizada de manera crítica y comparativa, con el objetivo de identificar tendencias actuales, avances relevantes y limitaciones persistentes en el campo.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

ESTRATEGIAS DE LA SÍNTESIS VERDE

La literatura revela una diversidad de enfoques para la síntesis verde de Bi-NS, que se clasifican principalmente en rutas mediadas por plantas y por microorganismos.

SÍNTESIS MEDIADA POR PLANTAS

Esta es la estrategia más reportada, que aprovecha la riqueza de metabolitos secundarios en extractos de hojas, frutos, cortezas y raíces. Estudios como los de Nasrollahzadeh y col. (2018) y Alam y col. (2013) destacan el uso de extractos de plantas medicinales para producir Bi-NS con tamaños bien definidos y alta estabilidad. Los compuestos fenólicos, flavonoides y terpenoides actúan como agentes reductores del precursor de bismuto (e.g., $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$) y como agentes estabilizantes que previenen la agregación de las nanopartículas.

Como se ilustra en la Figura 1, los metabolitos secundarios presentes en los extractos vegetales actúan como agentes reductores y estabilizantes, lo que permite la formación de nanoestructuras metálicas estables.

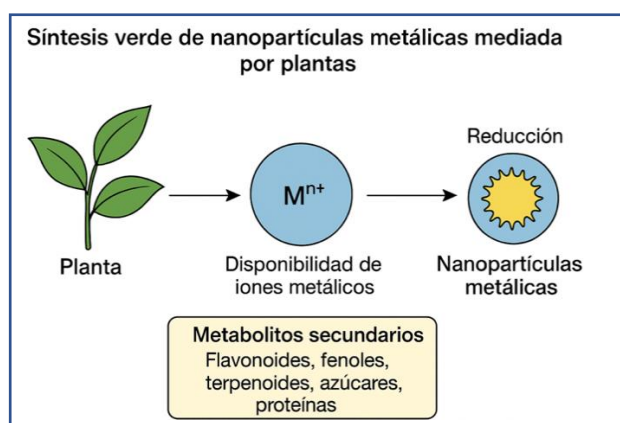


Figura 9. Síntesis verde de nanopartículas metálicas mediada por extractos vegetales. Los metabolitos secundarios actúan como agentes reductores y estabilizantes. Nota: Adaptado de "Green nanotechnologies: Synthesis of metal nanoparticles using plants", por Makarov y col., 2014, Acta Naturae.

SÍNTESIS MEDIADA POR MICROORGANISMOS

Bacterias, hongos y levaduras también se emplean para la producción de Bi-NS. Makarov y col. (2014) demostraron la capacidad de varios sistemas microbianos para reducir iones de bismuto tanto intracelular como extracelularmente. Aunque este método puede ofrecer un control fino de las condiciones de síntesis, a menudo presenta mayores desafíos en términos de rendimiento y control morfológico que los extractos vegetales.

La Figura 2 esquematiza los principales mecanismos involucrados en la biosíntesis de nanoestructuras de bismuto mediada por microorganismos, en la que enzimas y metabolitos intracelulares o extracelulares facilitan la reducción y la estabilización de los iones metálicos.

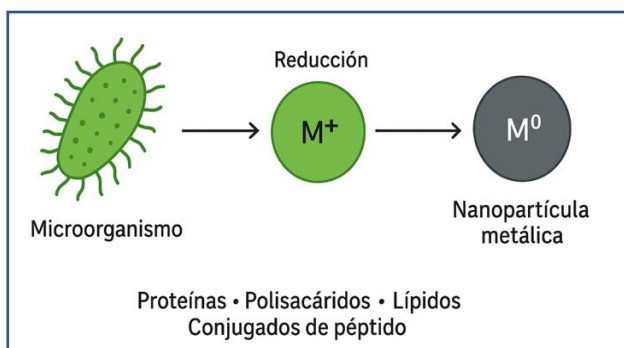


Figura 2. Biosíntesis de nanopartículas mediada por microorganismos: Las bacterias, hongos y algas pueden reducir iones metálicos (M^{n+}) a nanopartículas metálicas (M^0) mediante enzimas reductasas, proteínas y metabolitos intracelulares o extracelulares.

Adaptado de *Plant-mediated green synthesis of nanostructures: Mechanisms, characterization, and applications* (Nasrollahzadeh y col. 2018).

MÉTODOS ASISTIDOS POR TECNOLOGÍA

Se han adaptado métodos físicos y químicos para ser más ecológicos. Por ejemplo, Sonkusare y col. (2018) utilizaron la irradiación de microondas con extractos biológicos, reduciendo significativamente los tiempos de reacción de horas a minutos. De manera similar, en los métodos hidrotermal y solvotermal se han utilizado solventes verdes acuosos, lo que ha mejorado la eficiencia energética general del proceso (Duan y col., 2015).

En la Figura 3 se presenta la adaptación de métodos físico-químicos convencionales a enfoques de química verde, destacando la sustitución de

solventes peligrosos, el uso de fuentes de energía más eficientes y la incorporación de agentes reductores naturales.

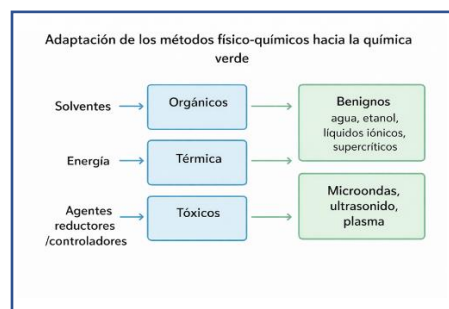


Figura 3. Adaptación de métodos físico-químicos a la química verde. Los métodos tradicionales se transforman mediante el uso de solventes benignos, fuentes de energía más eficientes y agentes reductores naturales, lo que reduce el impacto ambiental del proceso de síntesis. Adaptado de *Green chemistry for nanoparticle synthesis* (Duan y col. 2015).

CONTROL MORFOLÓGICO Y PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

Uno de los hallazgos más consistentes es la capacidad de los métodos verdes para ejercer un control significativo sobre la morfología de las Bi-NS. La Tabla 1 resume la eficiencia de síntesis y el control morfológico reportados en estudios clave.

Tabla 1. Evaluación comparativa de métodos de síntesis verde de nanoestructuras de bismuto.

Referencia	Agente verde o método	Eficiencia de síntesis	Control morfológico	Morfologías principales
Kim y col., (2010)	Biomoléculas (Cisteína)	Moderada, a baja temperatura	Alto, ajustable por pH y concentración	Nanovarillas, nanoalambres
Fang, (2021)	Extractos de plantas y microorganismos	Moderada, tiempos de reacción variables	Bueno, influenciado por los fitocompuestos	Esferas, varillas
Makarov y col., (2014)	Varios extractos de plantas	Alta tasa de reducción	Tamaño y forma influenciados por la especie vegetal	Nanopartículas esféricas
Sonkusare y col., (2018)	Microondas asistido por extracto	Muy alta, tiempos cortos	Control morfológico por tiempo de irradiación	Microflores, microhusos
Wang y col., (2014)	Método de termólisis	Alta, con temple rápido	Uniformidad en nanosferas	Nanosferas uniformes

Como se observa en la Tabla 1, parámetros como el pH, la temperatura, la concentración del extracto y el tiempo de reacción son críticos para definir el

tamaño y la forma finales de las Bi-NS. Por ejemplo, Kim y col. (2010) demostraron cómo una biomolécula simple, como la cisteína, permite la formación de nanovarillas u nanoalambres de sulfuro de bismuto bajo diferentes condiciones. La caracterización mediante técnicas como microscopía electrónica de transmisión (TEM), microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (XRD) confirma que las Bi-NS obtenidas mediante síntesis verde a menudo exhiben una alta cristalinidad y propiedades superficiales únicas conferidas por los agentes biológicos de cobertura, lo que, a su vez, influye en su rendimiento funcional.

APLICACIONES FUNCIONALES EN FOTOCATÁLISIS Y BIOMEDICINA

El potencial de aplicación de las Bi-NS obtenidas mediante síntesis verde, en particular en la remediación ambiental y la biomedicina, es de alto impacto.

Aplicaciones fotocatalíticas: Esta es el área de aplicación más explorada. Las Bi-NS han demostrado una eficiencia excepcional en la degradación de una amplia gama de contaminantes bajo luz visible. Oladipo y Mustafa (2023) usaron fotocatalizadores de bismuto para la degradación de antibióticos y colorantes orgánicos, destacando tasas de degradación superiores al 90% para compuestos como la tetraciclina y el azul de metileno. La formación de heterouniones (por ejemplo, con óxidos de grafeno u otros semiconductores) en rutas de síntesis verde ha permitido una mejora significativa en la separación de cargas y, por lo tanto, en la actividad fotocatalítica (Dutta y col., 2020; Batool y col., 2021).

Aplicaciones biomédicas: La biocompatibilidad inherente de las Bi-NS sintetizadas las convierte en de gran importancia en diversas aplicaciones médicas. Wei y col. (2016) desarrollaron nanopartículas de bismuto para su uso como agentes de contraste en tomografía computarizada (TC), mostrando una excelente visualización del tracto gastrointestinal in vivo. Otras aplicaciones prometedoras incluyen la liberación controlada de fármacos, en la que las Bi-NS pueden ser funcionalizadas con biomoléculas (Shahbazi y col., 2020), y la actividad antibacteriana, aprovechando el efecto biocida de los iones de bismuto y de las especies reactivas de oxígeno generadas (Fang, 2021).

ANÁLISIS CRÍTICO: FORTALEZAS Y DEBILIDADES DEL CAMPO

Para una evaluación integral, la Tabla 2 presenta un análisis crítico de los aspectos clave de la síntesis verde de Bi-NS, sintetizando las fortalezas y debilidades identificadas en la literatura.

Tabla 2. Análisis crítico de la síntesis verde de nanoestructuras de bismuto.

Aspecto	Fortalezas	Debilidades
Técnicas de síntesis	Amplio espectro de métodos; costo-efectivos; baja toxicidad; producen NS biocompatibles (Makarov y col., 2014; Gupta, 2023).	Protocolos a escala de laboratorio; variabilidad biológica; problemas de reproducibilidad (Mofijur y col., 2022).
Comprensión mecanicista	Conocimiento detallado del rol de biomoléculas (flavonoides, proteínas) en la reducción y estabilización (Nasrollahzadeh y col., 2018).	Mecanismos moleculares precisos a menudo no elucidados; falta de evidencia experimental directa (Mofijur y col., 2022).
Caracterización y control morfológico	Caracterización extensa (TEM, XRD); diseño morfológico mediante biomoléculas; propiedades comparables o superiores a las de métodos convencionales (Kim y col., 2010; Wang y col., 2014).	Caracterización a veces limitada a análisis básicos; estudios comparativos escasos; variabilidad entre lotes (Batool y col., 2021).
Aplicaciones multifuncionales	Alta actividad fotocatalítica; versatilidad en biomedicina (análisis de imágenes, liberación de fármacos); perfil de sostenibilidad (Shahbazi y col., 2020).	Estudios mayormente a nivel de prueba de concepto; validación in vivo o en campo limitado; evaluaciones de toxicidad insuficientes (Mofijur y col., 2022).

Este análisis revela una paradoja central en el campo: las mismas características que hacen atractiva la síntesis verde (el uso de sistemas biológicos complejos) también son la fuente de sus principales limitaciones (variabilidad y desafíos de control). Superar esta paradoja es el principal desafío para la comunidad científica.

LIMITACIONES Y FUTURAS DIRECCIONES

El análisis de la literatura expone limitaciones importantes que deben abordarse para impulsar el campo.

Limitaciones principales:

1. Escalabilidad limitada. La gran mayoría de los protocolos están optimizados para escalas de miligramos, con poca consideración de

los desafíos de producción a granel (Mofijur y col., 2022; Gupta, 2023).

2. Falta de protocolos estandarizados. La variabilidad en la preparación de extractos biológicos conduce a una pobre reproducibilidad y comparabilidad entre estudios (Nasrollahzadeh y col., 2018).
3. Análisis de toxicidad insuficiente. Si bien se promociona la biocompatibilidad, los estudios de toxicidad a largo plazo y el impacto ambiental de las Bi-NS verdes son escasos y a menudo preliminares (Shahbazi y col., 2020).
4. Enfoque desproporcionado en fotocatalisis. Otras aplicaciones potencialmente valiosas, como el almacenamiento de energía o la catálisis (no foto), están poco exploradas (Batool y col., 2021).

Direcciones futuras prioritarias:

1. Estudios mecanísticos *in situ*. Emplear técnicas espectroscópicas avanzadas para caracterizar *in situ* los compuestos intermedios de reacción y elucidar los mecanismos de reducción y estabilización a nivel molecular.
2. Ingeniería de procesos para la escalabilidad: Desarrollar biorreactores y procesos continuos para la síntesis verde, optimizando parámetros como la aireación, la mezcla y la relación sustrato-biomasa.
3. Estandarización y purificación: Establecer protocolos estandarizados para la preparación y caracterización de extractos biológicos. Explorar el uso de biomoléculas purificadas (enzimas, polisacáridos) para mejorar la reproducibilidad.
4. Evaluación de ciclo de vida (LCA) y toxicología. Realizar LCA completos para cuantificar los beneficios ambientales reales de las rutas de síntesis verde frente a las convencionales. Llevar a cabo estudios de toxicidad sistemáticos *in vitro* e *in vivo* para asegurar la seguridad de las aplicaciones

CONCLUSIONES

Esta revisión sistemática consolida la evidencia que posiciona a la síntesis verde como una metodología robusta y prometedora para la fabricación de nanoestructuras de bismuto. Las rutas que emplean extractos de plantas, microorganismos y condiciones energéticamente eficientes no solo ofrecen una alternativa sostenible a los métodos convencionales, sino que también



permiten un control notable de la morfología y confieren propiedades superficiales únicas que mejoran el rendimiento funcional. Las aplicaciones en fotocatalisis ambiental y biomedicina demuestran un potencial significativo para abordar desafíos globales en contaminación y salud.

Sin embargo, la transición de esta tecnología prometedora desde el laboratorio hasta aplicaciones industriales y clínicas reales depende de la superación de desafíos críticos, en particular, la reproducibilidad, la escalabilidad y la validación de seguridad a largo plazo. Los esfuerzos de investigación futuros deben adoptar un enfoque interdisciplinario, integrando la nanociencia, la biología, la ingeniería de procesos y la toxicología para cerrar las brechas de conocimiento identificadas y materializar el potencial completo de las nanoestructuras de bismuto verdes para un futuro más sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Programa de Maestría en Ciencia y Tecnología de la Metalurgia de la Facultad de Metalurgia de la Universidad Autónoma de Coahuila, así como a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el otorgamiento de la beca de manutención que hizo posible el desarrollo de este trabajo. (CVU 2081707).

REFERENCIAS

- Alam, N., Roy, N., Mandal, D. & Begum, N. A. (2013). Green chemistry for nanochemistry: Exploring medicinal plants for the biogenic synthesis of metal NPs with fine-tuned properties. *RSC Advances*, 3(30): 11935–11956.
- Batool, M., Nazar, M. F., Awan, A., Tahir, M., Rahdar, A., Shalan, A. E. & Zafar, M. N. (2021). Bismuth-based heterojunction nanocomposites for photocatalysis and heavy metal detection applications. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 27: 100762.
- Brown, T. L., LeMay, H. E. & Bursten, B. E. (2004). *Química: La ciencia central* (Quinta edición). México: Ed. Prentice-Hall Hispanoamerica S.A. 1152 pp.
- Duan, H., Wang, D. & Li, Y. (2015). Green chemistry for nanoparticle synthesis. *Chemical Society Reviews*, 44(16): 5778–5792.



- Dutta, V., Sharma, S., Raizada, P., Kumar, R., Thakur, V. K., Nguyen, V. & Singh, P. (2020). Recent progress on bismuth-based Z-scheme semiconductor photocatalysts for energy and environmental applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6): 104505.
- Fang, L. (2021). Green synthesis of nanomaterials from sustainable materials for biosensors and drug delivery. *Sensors International*, 3: 100166.
- Gupta, D. (2023). Green and sustainable synthesis of nanomaterials: Recent advancements and limitations. *Environmental Research*, 231: 116316.
- Kim, J. H., Park, H., Hsu, C. & Xu, J. (2010). Facile synthesis of bismuth sulfide nanostructures and morphology tuning by a biomolecule. *Journal of Physical Chemistry C*, 114(21): 9634–9639.
- Makarov, V. V., Love, A. J., Sinityna, O. V., Makarova, S. S., Yaminsky, I. V., Taliansky, M. & Kalinina, N. O. (2014). Green nanotechnologies: Synthesis of metal nanoparticles using plants. *Acta Naturae*, 6(1): 35–44.
- Mofijur, M., Lagarto, J. L. & Punda, M. (2022). Green approaches in synthesising nanomaterials for environmental nanobioremediation: Technological advancements, applications, benefits and challenges. *Environmental Research*, 204: 111967.
- Nasrollahzadeh, M., Atarod, M., Sajjadi, M., Sajadi, S. M. & Issaabadi, Z. (2018). Plant-mediated green synthesis of nanostructures: Mechanisms, characterization, and applications. *Interface Science and Technology*, 28: 199–322.
- Oladipo, A. A. & Mustafa, F. (2023). Bismuth-based nanostructured photocatalysts for the remediation of antibiotics and organic dyes. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 14: 291–321.
- Patwardhan, S. V., Manning, J. R. H. & Chiacchia, M. (2018). Bioinspired synthesis as a potential green method for the preparation of nanomaterials: Opportunities and challenges. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 12: 110–116.
- Shahbazi, M., Faghfour, L., Ferreira, M. P. A., Figueiredo, P., Maleki, H. & Santos, H. A. (2020). The versatile biomedical applications of bismuth-based nanoparticles and composites: Therapeutic, diagnostic, biosensing, and regenerative properties. *Chemical Society Reviews*, 49(4): 1253–1321.
- Sonkusare, V. N., Chaudhary, R. G., Bhusari, G. S., Rai, A. R. & Juneja, H. D. (2018). Microwave-mediated synthesis, photocatalytic degradation and antibacterial activity of α - Bi_2O_3 microflowers/novel γ - Bi_2O_3 microspindles. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 13: 121–131.
- Varma, R. S. (2012). Greener approach to nanomaterials and their sustainable applications. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 1(2): 123–128.
- Wang, S., Wang, L. & Huang, W. (2020). Bismuth-based photocatalysts for solar energy conversion. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(46): 24307–24352.

Wang, Z., Jiang, C., Huang, R., Peng, H. & Tang, X. (2014). Investigation of optical and photocatalytic properties of bismuth nanospheres prepared by a facile thermolysis method. *Journal of Physical Chemistry C*, 118(2): 1155–1160.

Wei, B., Zhang, X., Zhang, C., Jiang, Y., Fu, Y., Yu, C. & Yan, X. (2016). Facile synthesis of uniform-sized bismuth nanoparticles for CT visualization of gastrointestinal tract in vivo. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(20): 12720–12726.