

Capítulo 8

Nanotecnología sostenible mediante generación de energía, síntesis verde de nanopartículas y nanocaracterización de materiales

*Antia Ivett Álvarez Bernabé, Juan Vicente Méndez Méndez,
Agustín Leobardo Herrera May, Israel Arzate Vázquez,
Gregorio Guadalupe Carbajal Arizaga*

Álvarez Bernabé, A. I., Méndez Méndez, J. V., Herrera May, A. L., Arzate Vázquez, I., & Carbajal Arizaga, G. G. (2026). Nanotecnología sostenible mediante generación de energía, síntesis verde de nanopartículas y nanocaracterización de materiales. En F. J. Manjarrés Arias. (Coord). *El espectro de las ingenierías. Investigaciones situadas en contextos regionales (Volumen I)*. (pp. 152-166). Religación Press. <http://doi.org/10.46652/religacionpress.401.c867>



08

Nanotecnología sostenible mediante generación de energía, síntesis verde de nanopartículas y nanocaracterización de materiales

Resumen

La nanotecnología constituye un campo interdisciplinario con un creciente impacto en la búsqueda de soluciones tecnológicas orientadas al desarrollo sostenible. Este capítulo examina tres enfoques complementarios que contribuyen a acercar la nanotecnología a contextos académicos, productivos y sociales mediante estrategias accesibles y sostenibles. En primer lugar, se describe el desarrollo de nanogeneradores triboeléctricos como sistemas de cosecha de energía capaces de transformar energía mecánica ambiental en energía eléctrica utilizable. En segundo lugar, se presenta la síntesis verde de nanopartículas obtenidas a partir de biomasa de microalgas cultivadas en laboratorio. Finalmente, se aborda la caracterización de materiales mediante microscopía de fuerza atómica, técnica que permite analizar la topografía y rugosidad superficial de materiales a escala nanométrica. En conjunto, el capítulo ofrece una visión integradora que articula energía, biotecnología y nanocaracterización como estrategias para ampliar el acceso al conocimiento nanotecnológico.

Palabras clave: Nanotecnología; energía verde; nanogeneradores; nanopartículas; microscopía.

Introducción

La nanotecnología ha emergido como uno de los campos más dinámicos de la ciencia contemporánea debido a su capacidad para manipular materiales a escala nanométrica y generar propiedades físicas, químicas y biológicas únicas. En las últimas décadas, este campo ha impulsado avances significativos en energía, medicina, biotecnología y ciencia de materiales. Sin embargo, uno de los principales desafíos actuales consiste en traducir estos avances científicos en soluciones accesibles, sostenibles y aplicables a diversos contextos sociales y productivos.

En muchos países en desarrollo, el acceso a tecnologías avanzadas se encuentra limitado por factores económicos, infraestructura científica restringida y altos costos asociados a los procesos de fabricación de nanomateriales. En este escenario, surge la necesidad de promover enfoques de nanotecnología sostenible que integren materiales accesibles, metodologías verdes y técnicas de caracterización avanzadas que permitan comprender y optimizar el comportamiento de los materiales.

Este capítulo aborda tres líneas de investigación que contribuyen a este objetivo. En primer lugar, se analiza el desarrollo de nanogeneradores triboeléctricos como dispositivos capaces de transformar energía mecánica en energía eléctrica utilizable, constituyendo una alternativa prometedora para sistemas de energía autónoma (Shi et al., 2024). En segundo lugar, se examina la síntesis verde de nanopartículas obtenidas a partir de microalgas, destacando su potencial para aplicaciones ambientales y biotecnológicas sostenibles (Sutradhar et al., 2025). Finalmente, se presenta la microscopía de fuerza atómica como una herramienta fundamental para comprender la topografía y rugosidad superficial de los materiales, factores que influyen directamente en su desempeño funcional (Joo et al., 2025).

La integración de estos tres enfoques permite explorar nuevas formas de democratizar el acceso a la nanotecnología, promoviendo su

aplicación en ámbitos educativos, científicos y productivos, así como en estrategias de innovación orientadas al desarrollo sostenible.

Marco conceptual de la nanotecnología sostenible

La nanotecnología sostenible surge como una evolución del enfoque tradicional de la nanotecnología, integrando principios de sostenibilidad ambiental, eficiencia energética y responsabilidad social en el desarrollo de materiales y dispositivos a escala nanométrica. Este enfoque busca minimizar el impacto ambiental de los procesos de síntesis, reducir el uso de sustancias tóxicas y promover el empleo de recursos renovables o reciclados en la fabricación de nanomateriales (Du et al., 2024).

En este contexto, la investigación contemporánea en nanotecnología se orienta hacia el desarrollo de soluciones que respondan simultáneamente a desafíos energéticos, ambientales y tecnológicos. Entre estas estrategias destacan los sistemas de cosecha de energía, la síntesis verde de nanomateriales y la aplicación de técnicas avanzadas de caracterización que permitan comprender la relación entre la estructura y la funcionalidad de los materiales a escala nanométrica.

Los nanogeneradores triboeléctricos representan una de las tecnologías emergentes dentro del campo de la energía sostenible, ya que permiten transformar energía mecánica ambiental en energía eléctrica utilizable mediante mecanismos de electrificación por contacto y acoplamiento electrostático (Shi et al., 2024). Esta tecnología ha demostrado un gran potencial para alimentar dispositivos electrónicos de baja potencia, sensores autónomos y sistemas de internet de las cosas, especialmente en entornos donde el acceso a fuentes de energía convencionales es limitado.

Por otro lado, la síntesis verde de nanopartículas constituye una alternativa sostenible frente a los métodos químicos tradicionales. Este enfoque utiliza organismos biológicos o extractos naturales como agentes reductores y estabilizadores durante la formación de nanopartículas, reduciendo la generación de residuos tóxicos y el consumo

energético asociado a los procesos de síntesis. En este sentido, las microalgas han sido ampliamente estudiadas debido a su capacidad para producir compuestos bioactivos que facilitan la formación de nanopartículas con propiedades funcionales para aplicaciones ambientales y biotecnológicas (Sutradhar et al., 2025).

Asimismo, la caracterización de materiales a escala nanométrica desempeña un papel fundamental en el diseño de tecnologías nanotecnológicas eficientes. Técnicas como la microscopía de fuerza atómica permiten analizar la topografía y rugosidad superficial de los materiales, proporcionando información detallada sobre las interacciones físicas que ocurren a nivel nanométrico (Joo et al., 2025). Estas propiedades superficiales son particularmente relevantes en dispositivos triboeléctricos, donde la morfología del material influye directamente en la transferencia de carga eléctrica.

En conjunto, la nanotecnología sostenible se configura como un campo interdisciplinario que integra principios de ingeniería, biotecnología y ciencia de materiales. Este enfoque permite desarrollar soluciones tecnológicas más accesibles y responsables, contribuyendo a la transición hacia modelos de innovación científica orientados al desarrollo sostenible y a la democratización del conocimiento nanotecnológico.

Nanogeneradores triboeléctricos como sistemas de cosecha de energía

Los nanogeneradores triboeléctricos constituyen una tecnología emergente capaz de convertir energía mecánica ambiental en energía eléctrica mediante el efecto triboeléctrico y la inducción electrostática. Estos dispositivos han despertado gran interés en los últimos años debido a su capacidad para alimentar sensores autónomos, dispositivos portátiles y sistemas de internet de las cosas sin requerir fuentes de energía convencionales (Du et al., 2024).

En esta investigación se diseñaron nanogeneradores triboeléctricos utilizando materiales poliméricos de bajo costo y elementos reci-

clados. La fabricación de los dispositivos se realizó a escala de laboratorio, empleando configuraciones simples que permitieron demostrar el principio de generación eléctrica a partir de excitación mecánica controlada, mediante el procedimiento para la elaboración y estudio de un nanogenerador triboeléctrico como se muestra en la figura 1.

El desempeño eléctrico de los dispositivos fue evaluado mediante instrumentos de medición eléctrica, registrando el voltaje generado durante ciclos de contacto y separación entre los materiales triboeléctricos. Estos experimentos permitieron analizar cómo las propiedades superficiales de los materiales influyen en la transferencia de carga y en la eficiencia de generación energética.



Figura 1. Procedimiento para la elaboración y estudio de un nanogenerador triboeléctrico
Nota: elaboración propia.

Síntesis verde de nanopartículas a partir de microalgas

La síntesis verde de nanopartículas representa una alternativa sostenible frente a los métodos químicos convencionales utilizados en la producción de nanomateriales. Este enfoque utiliza organismos biológicos, extractos vegetales o biomasa microbiana como agentes reductores y estabilizadores durante la formación de nanopartículas.

En el presente estudio se empleó biomasa de microalgas cultivadas en laboratorio para la obtención de nanopartículas mediante un proceso de síntesis biológica. Este proceso se basa en la capacidad de los metabolitos presentes en las microalgas para reducir iones metálicos y estabilizar las nanopartículas formadas.

Las nanopartículas obtenidas fueron caracterizadas mediante densidad óptica (OD) por espectroscopía visible, microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), con el propósito de analizar su morfología y propiedades estructurales, siguiendo los procedimientos reportados para nanopartículas sintetizadas por rutas verdes a partir de microalgas (Michalec et al., 2025). Finalmente, se evaluó su aplicación en el tratamiento de aguas residuales mediante pruebas químicas y microbiológicas, considerando parámetros como OD, NO_3^- , NO_2^- , $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ y porcentaje de floculación (Figura 2) en concordancia con la evidencia reciente sobre la eficiencia de microalgas en la remoción de nutrientes y su implementación en procesos de tratamiento y con estudios actuales que documentan el uso de estrategias de coagulación/floculación asociadas a sistemas con microalgas en matrices de aguas residuales (Liberti et al., 2024). Asimismo, revisiones recientes destacan la convergencia entre microalgas y nanopartículas como una vía sostenible para aplicaciones ambientales y de remediación (Sutradhar et al.,

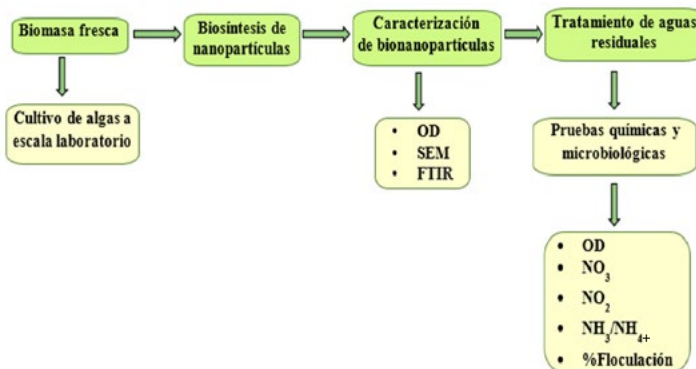


Figura 2. Metodología para la obtención de nanopartículas. Nota: elaboración propia.

Integración de resultados de los enfoques nanotecnológicos sostenibles

La convergencia entre generación de energía, biotecnología y nanocaracterización permite desarrollar estrategias nanotecnológicas orientadas al desarrollo sostenible. La integración de estos enfoques facilita la creación de tecnologías accesibles que combinan el aprovechamiento de recursos biológicos, el uso de materiales de bajo costo y el análisis avanzado de propiedades superficiales.

Este enfoque interdisciplinario abre nuevas oportunidades para el desarrollo de soluciones tecnológicas aplicables en sectores como la agricultura inteligente, la gestión ambiental, la educación científica y el desarrollo de dispositivos autónomos.

Los resultados obtenidos evidencian que la nanotecnología puede desarrollarse mediante enfoques accesibles y sostenibles sin comprometer su funcionalidad. En el caso de los nanogeneradores triboeléctricos, los nanogeneradores fabricados con materiales poliméricos de bajo costo mostraron una respuesta eléctrica estable bajo excitación mecánica controlada (Figura 4). Se observó que el desempeño del dispositivo está directamente influenciado por las características superficiales de los materiales en contacto, lo que favorece la transferencia de carga triboeléctrica.

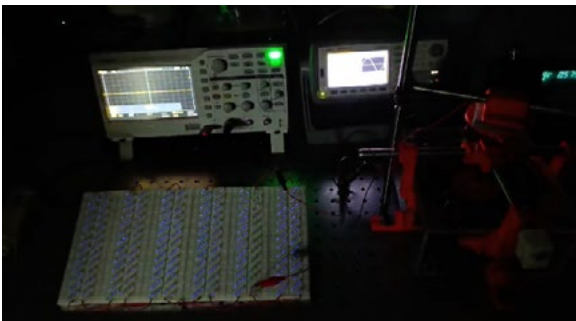


Figura 4. Sistema experimental para la evaluación de un TENG, mostrando el dispositivo en operación, el sistema de excitación mecánica y los equipos de medición eléctrica utilizados para el registro de la señal generada.

Nota: elaboración propia.

Respecto a las nanopartículas derivadas de microalgas, los procesos de síntesis verde permitieron obtener estructuras con una distribución homogénea y propiedades funcionales adecuadas para aplicaciones biotecnológicas. Estos resultados confirman que las microalgas representan una fuente viable y ambientalmente responsable para la obtención de nanopartículas con potencial uso en agricultura sostenible, protección ambiental y sistemas biofuncionales (Figura 5).

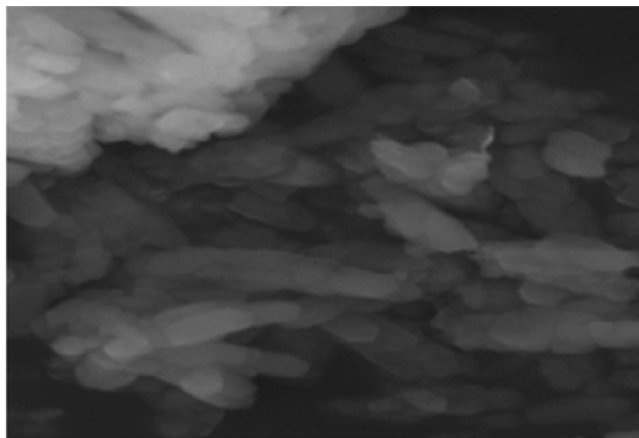


Figura 5. Nanopartículas de ZnO por síntesis verde de microalgas, presentan una superficie lisa y forma de bastones. Nota: elaboración propia.

La caracterización mediante Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) proporcionó información detallada sobre la topografía y morfología superficial de los materiales analizados (Figura 6). Las imágenes obtenidas permitieron identificar patrones estructurales a escala nanométrica que explican las diferencias observadas en el desempeño de los nanogeneradores. En conjunto, los resultados demuestran una relación clara entre estructura, funcionalidad y aplicación, validando la integración de técnicas de nanocaracterización como herramienta clave para el diseño y optimización de tecnologías nanotecnológicas accesibles.

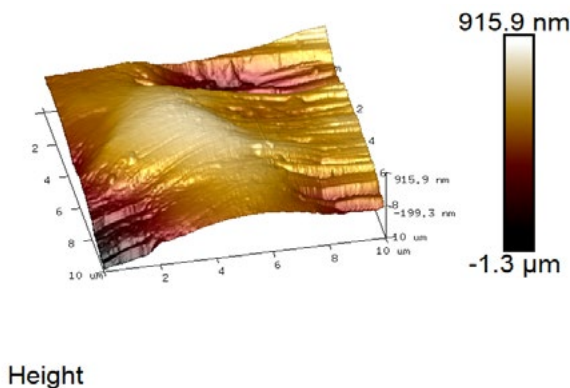


Figura 6. Material de teflón (PTFE), presenta una topografía con picos alineados y mesetas en un solo sentido favoreciendo la generación de carga.

Nota: elaboración propia.

Conclusiones

La presente investigación demuestra que la nanotecnología puede desarrollarse y aplicarse de manera accesible, sostenible y con impacto social, cumpliendo los objetivos planteados. Los resultados obtenidos confirman que los nanogeneradores triboeléctricos constituyen una alternativa viable para la generación autónoma de energía verde, especialmente cuando se emplean materiales de bajo costo y se optimizan sus superficies a escala nanométrica.

Asimismo, se evidenció que las nanopartículas derivadas de microalgas, obtenidas mediante síntesis verdes, representan una opción biotecnológica prometedora, alineada con principios de sostenibilidad ambiental. Su potencial aplicación en agricultura, salud y remediación ambiental refuerza la importancia de integrar biomateriales en el desarrollo de soluciones nanotecnológicas responsables.

Por otro lado, la microscopía de fuerza atómica (AFM) se consolidó como una herramienta clave para comprender la relación entre la topografía superficial y el desempeño funcional de materiales y dispositivos. El análisis de rugosidad y morfología permitió explicar de manera directa los comportamientos observados en los nanogeneradores, aportando conocimiento fundamental para el diseño y optimización de tecnologías futuras.

En conjunto, los aportes de este trabajo fortalecen una visión de nanotecnología al alcance de todos, donde la integración de energía, biotecnología y nanocaracterización impulsa una ciencia con propósito, orientada al desarrollo sostenible, la divulgación científica y la transferencia de conocimiento hacia contextos educativos y productivos.

Referencias

- Bakhtiyari, S., Bagherzadeh, R., Ezazshahabi, N., Jahanshahi, A., Van Langenhove, L., & Malengier, B. (2025). Yarn-to-yarn surface area and roughness as structural engineering tools for optimizing the electrical output of triboelectric nanogenerators: Geometrical and experimental verification. *Advanced Materials Technologies*, 10(7). <https://doi.org/10.1002/admt.202401346>
- Du, T., Chen, Z., Dong, F., Cai, H., Zou, Y., Zhang, Y., Sun, P., & Xu, M. (2024). Advances in green triboelectric nanogenerators. *Advanced Functional Materials*, 34(24). <https://doi.org/10.1002/adfm.202313794>
- Joo, S., Eom, S., Choi, Y., Jeong, U., Cho, Y., Yu, W., Park, K., & Hong, S. (2025). Atomic force microscopy for cross-disciplinary materials research. *Small Methods*, 9(11). <https://doi.org/10.1002/smt.202500514>
- Liberti, D., Pinheiro, F., Simões, B., Varela, J., & Barreira, L. (2024). Beyond bioremediation: The untapped potential of microalgae in wastewater treatment. *Water*, 16(19). <https://doi.org/10.3390/w16192710>
- Michalec, S., Niecekarz, W., Klimek, W., Lange, A., Matuszewski, A., Piotrowska, K., Hotowy, A., Kunowska-Słószarz, M., & Sosnowska, M. (2025). Green synthesis of silver nanoparticles from *Chlorella vulgaris* aqueous extract and their effect on *Salmonella enterica* and chicken embryo growth. *Molecules*, 30(7). <https://doi.org/10.3390/molecules30071521>
- Shi, Z., Zhang, Y., Gu, J., Liu, B., Fu, H., Liang, H., & Ji, J. (2024). Triboelectric nanogenerators: State of the art. *Sensors*, 24(13). <https://doi.org/10.3390/s24134298>
- Sutradhar, M., Sharma, R. K., Dey, G., Sukul, U., Das, K., Taharia, M., Lin, P.-Y., Ali, S., Wang, C.-W., & Chen, C.-Y. (2025). Freshwater microalgae-mediated engineered nanoparticles: Sustainable approach for heavy metals remediation. *Bioresource Technology*, 434. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132761>

Antia Ivett Álvarez Bernabé

Instituto Tecnológico Superior de Misantla | Veracruz | México

<https://orcid.org/0009-0007-5433-9092>

232t0519@itsm.edu.mx

ivettalvarez83@gmail.com

Ingeniera Bioquímica por el Tecnológico Nacional de México, Maestra en Ingeniería Industrial por el Tecnológico Nacional de México. Actualmente alumna de posgrado candidata a Doctor en Ciencias de la Ingeniería

Juan Vicente Méndez Méndez

Instituto Politécnico Nacional | Ciudad de México | México

Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías | Ciudad de México | México

<https://orcid.org/0000-0002-1227-8072>

jmendezm@ipn.mx

najuvi@hotmail.com

Ingeniero mecánico por el Instituto Politécnico Nacional y Doctorado Ingeniería Mecánica por la universidad de Manchester Reino Unido. Actualmente docente e investigador del Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnología del Instituto Politécnico Nacional.

Agustín Leobardo Herrera May

Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías | Ciudad de México | México

<https://orcid.org/0000-0002-7373-9258>

leherrera@uv.mx

Es investigador del Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología (MICRONA) de la Universidad Veracruzana (UV). Dirige el grupo de investigación en Micro y Nanodispositivos.

Israel Arzate Vázquez

Instituto Politécnico Nacional | Ciudad de México | México

<https://orcid.org/0000-0002-9220-2405>

iarzate@ipn.mx

alexfe26@yahoo.com.mx

Doctor en Ciencias de los Alimentos egresado de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas-IPN. Actualmente es especialista del Laboratorio de AFM y Nanoindentación del CNMN-IPN. Perteneció al SNII Nivel I.

Gregorio Guadalupe Carbajal Arizaga

Universidad de Guadalajara | Guadalajara | Jalisco

<https://orcid.org/0000-0003-3120-0243>

gregorio.carbajal@academicos.udg.mx

gregoriocarbajal@yahoo.com.mx

Doctor en Química. Profesor docente en la Universidad de Guadalajara. Dedicado a la investigación en química de materiales laminares y materiales multifuncionales.

Sustainable Nanotechnology through Energy Generation, Green Synthesis of Nanoparticles, and Nanoscale Material Characterization

Abstract

Nanotechnology constitutes an interdisciplinary field with a growing impact on the search for technological solutions aimed at sustainable development. This chapter examines three complementary approaches that contribute to bringing nanotechnology closer to academic, productive, and social contexts through accessible and sustainable strategies. First, the development of triboelectric nanogenerators as energy harvesting systems capable of converting ambient mechanical energy into usable electrical energy is described. Second, the green synthesis of nanoparticles obtained from microalgae biomass cultivated in the laboratory is presented. Finally, the characterization of materials using atomic force microscopy is addressed, a technique that allows the analysis of the topography and surface roughness of materials at the nanoscale. Together, the chapter offers an integrative vision that articulates energy, biotechnology, and nanoscale characterization as strategies to broaden access to nanotechnological knowledge.

Keywords: Nanotechnology; green energy; nanogenerators; nanoparticles; microscopy.

Nanotecnologia Sustentável por meio da Geração de Energia, Síntese Verde de Nanopartículas e Nanocaracterização de Materiais

Resumo

A nanotecnologia constitui um campo interdisciplinar com crescente impacto na busca por soluções tecnológicas voltadas ao desenvolvimento sustentável. Este capítulo examina três abordagens complementares que contribuem para aproximar a nanotecnologia de contextos acadêmicos, produtivos e sociais por meio de estratégias acessíveis e sustentáveis. Em primeiro lugar, descreve-se o desenvolvimento de nanogeradores triboelétricos como sistemas de coleta de energia capazes de transformar energia mecânica ambiental em energia elétrica utilizável. Em segundo lugar, apresenta-se a síntese verde de nanopartículas obtidas a partir de biomassa de microalgas cultivadas em laboratório. Finalmente, aborda-se a caracterização de materiais por meio da microscopia de força atômica, técnica que permite analisar a topografia e a rugosidade superficial de materiais em escala nanométrica. Em conjunto, o capítulo oferece uma visão integradora que articula energia, biotecnologia e nanocaracterização como estratégias para ampliar o acesso ao conhecimento nanotecnológico.

Palavras-chave: Nanotecnologia; energia verde; nanogeradores; nanopartículas; microscopia.