

Artículo de divulgación

Nanofertilizantes: la nueva generación de fertilizantes para una agricultura sostenible

Nanofertilizers: the new generation of fertilizers for sustainable agriculture

Sheyla Paola Pérez-de los Santos ¹, Víctor Manuel Ruíz-Valdiviezo ¹, Joaquín Adolfo Montes-Molina ¹, Magín González-Moscó ^{1,*}

¹ Laboratorio de Biología Molecular. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

*Autor para correspondencia: magingonmos@gmail.com

Recibido:

20/07/2026

Aceptado:

13/10/2026

Publicado:

14/10/2026

RESUMEN

El uso excesivo de fertilizantes químicos en la agricultura ha propiciado el deterioro de los suelos y la contaminación del agua. Además, los problemas ocasionados por el cambio climático reducen la posibilidad de producir alimentos de calidad y que puedan abastecer las necesidades de la población mundial. Ante estos problemas, se han buscado alternativas de fertilización sostenibles para la agricultura. En este sentido, la nanotecnología es una herramienta nueva y con un alto potencial para incrementar y mejorar la producción de alimentos. El uso de nanomateriales como nanofertilizantes favorece el desarrollo de una agricultura sostenible al suministrar concentraciones bajas que pueden no afectar los ecosistemas. Debido a sus propiedades fisicoquímicas dadas por su escala nanométrica tienen la capacidad de eficientizar el uso de los nutrientes y aumentar muchos procesos bioquímicos y fisiológicos que se reflejarán en el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, existen pocos estudios del impacto negativo que puede tener el uso de los nanofertilizantes en los ecosistemas a lo largo del tiempo, lo anterior debido a su poca o nula regulación. Por lo anterior, la regulación de los nanofertilizantes y su uso adecuado son necesarios para garantizar su sostenibilidad y un menor impacto ambiental. El objetivo de la presente investigación fue analizar la importancia de los nanofertilizantes en la agricultura sostenible moderna.

Palabras clave: Nanotecnología; fertilizantes; agricultura sostenible; nanopartículas.

ABSTRACT

The excessive use of chemical fertilizers in agriculture has led to soil degradation and water pollution. Furthermore, the problems caused by climate change reduce the ability to produce high-quality food capable of meeting the needs of the world's population. In light of these challenges, sustainable fertilization alternatives for agriculture have been sought. In this regard, nanotechnology is a new tool with great potential to improve food production. The use of nanomaterials, such as nanofertilizers, promotes sustainable agriculture by delivering low concentrations that are unlikely to affect ecosystems. Due to their physicochemical properties resulting from their nanoscale size, they have the ability to improve nutrient use efficiency and enhance many biochemical and physiological processes, which will be reflected in crop yields. However, there are few studies on the

potential negative long-term impact of nanofertilizer use on ecosystems, largely due to the lack of regulation or minimal regulation in this area. Therefore, the regulation of nanofertilizers and their proper use are necessary to ensure their sustainability and minimize environmental impact. The objective of this research was to analyze the importance of nanofertilizers in sustainable modern agriculture.

Keywords: Nanotechnology; fertilizers; sustainable agriculture; nanoparticles.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento continuo de la población mundial ha incrementado la demanda de alimentos y, con ello, la necesidad de aumentar la productividad agrícola. En este contexto, se ha impulsado el desarrollo de estrategias que permitan producir más alimentos de manera sostenible, garantizando la seguridad alimentaria y reduciendo el impacto ambiental asociado a las prácticas de producción (United Nations, 2022; FAO, 2024).

Para satisfacer esta demanda, la agricultura ha recurrido al uso intensivo de fertilizantes químicos convencionales. No obstante, estos fertilizantes presentan una baja eficiencia en el uso de los nutrientes, por lo que una proporción considerable de estos se pierde por diferentes procesos, lo que reduce su aprovechamiento y genera efectos negativos sobre el suelo (Babu et al., 2022; Al Mamun et al., 2021).

Como alternativa a esta problemática, la nanotecnología ha emergido como una herramienta innovadora para el desarrollo de insumos agrícolas más eficientes debido a su capacidad para diseñar materiales con propiedades fisicoquímicas distintas a las de sus formas convencionales. Los materiales a escala nanométrica presentan una elevada relación superficie-volumen (RS-V) y una mayor reactividad, características que favorecen la interacción con los tejidos vegetales y permiten optimizar la disponibilidad y liberación de nutrientes obteniendo un mayor aprovechamiento por las plantas (Mim et al., 2025).

En la actualidad, los nanofertilizantes (NFs) se consideran una de las tecnologías con mayor potencial para mejorar la eficiencia de la fertilización agrícola dado a que sus características facilitan e incrementan la disponibilidad y el aprovechamiento de macro y micronutrientes por parte de las plantas (Mehta et al., 2024). Debido a ello, los NFs representan una estrategia con alto potencial para incrementar la productividad de los cultivos y promover una agricultura más sostenible

(Upadhyay et al., 2024). Por lo anterior, este artículo de divulgación presenta la importancia de los NFs en la agricultura moderna, como una alternativa novedosa para mejorar la nutrición de los cultivos y como estrategia para enfrentar el estrés ocasionado por el cambio climático.

FERTILIZANTES CONVENCIONALES

Los fertilizantes convencionales son insumos de origen mineral e inorgánico, cuya composición se basa principalmente en macronutrientes como Nitrógeno (N), Fósforo (P) y potasio (K), suministrados en formas disponibles para las plantas y destinados a satisfacer los requerimientos nutricionales de los cultivos (Priya et al., 2024). Un ejemplo es la urea, uno de los fertilizantes nitrogenados más utilizados cuya producción parte desde el amoníaco, obtenido principalmente mediante el proceso Haber-Bosch, en el cual el nitrógeno (N_2) y el hidrógeno (H_2) reaccionan a altas temperaturas y presiones en presencia de un catalizador (Humphreys et al., 2021). En este sentido, los fertilizantes han sido una herramienta fundamental debido a su capacidad para mejorar la productividad de los cultivos. No obstante, su uso excesivo e indiscriminado ha generado importantes problemas ambientales a nivel mundial. En la agricultura convencional se usan fertilizantes como el N, P, K y micronutrientes, en el caso del N el más utilizado es la urea, sin embargo, su eficiencia de absorción es baja y se pierde la mitad de lo que se aplica antes de que pueda ser absorbido por las plantas (González-Feijo et al., 2024).

Desafortunadamente, la urea contribuye a la contaminación derivado a la pérdida entre 50-70% de la volatilización del amoníaco, y también provoca lixiviación generando un desequilibrio en los suelos e incluso causa eutrofización en cuerpos de agua (Goyal et al., 2025). En cuanto al P aplicado mediante fertilizantes convencionales presenta una limitada disponibilidad para las plantas debido a su tendencia a inmovilizarse en



el suelo, lo que reduce su aprovechamiento por los cultivos y puede generar desequilibrios en la nutrición vegetal al disminuir su absorción. Estas alteraciones pueden afectar negativamente la flora y fauna acuática y comprometer el equilibrio ecológico de los ecosistemas (Saurabh et al., 2024).

Sin embargo, el N y el P no son los únicos fertilizantes que provocan daños, el uso en exceso de otros macronutrientes y micronutrientes ha generado un desequilibrio en la agricultura desde la contaminación hasta la degradación de los suelos.

NANOFERTILIZANTES

La búsqueda de implementar tecnologías más eficientes para el manejo de nutrientes a sistemas agrícolas ha impulsado la incorporación de herramientas basadas en nanotecnología. Dentro de las cuales se encuentran los NFs, que destacan por ser formulaciones diseñadas a partir de materiales nanoestructurados con características particulares debido a su reducido tamaño (entre 1 y 100 nm) (Nongbet et al., 2022). Por otra parte, debido a su elevada RS-V, pueden presentar fenómenos de aglomeración, donde los agregados podrían tener un mayor tamaño, variando así la estabilidad coloidal, movilidad y disponibilidad del nutriente durante la aplicación agrícola (Joudeh & Linke, 2022). Por otro lado, los NFs se utilizan para liberar nutrientes de forma lenta, proporcionando a las plantas agrícolas una entrega constante de nutrientes (Bastakoti et al., 2026). En este sentido, los NFs pueden aportar macro y micronutrientes de manera más eficiente (Nongbet et al., 2022). Lo anterior, permite reducir las pérdidas de nutrientes, mejorar el rendimiento de los cultivos y minimizar el impacto ambiental que permitan considerarla como una tecnología sostenible (Swain et al., 2026).

Asimismo, cabe destacar que los NFs están constituidos por nanopartículas capaces de mejorar la dinámica de los nutrientes en el sistema suelo-planta. Lo anterior, se debe a sus propiedades fisicoquímicas como la elevada RS-V, que permite una mayor interacción con los elementos nutritivos y su entorno radicular (Manzoor et al., 2022).

Por otra parte, la obtención de NFs puede llevarse a cabo mediante diferentes estrategias de síntesis, empleando como precursores fertilizantes convencionales, reactivos químicos o compuestos bioactivos provenientes de extractos vegetales (Gade et al., 2023). De acuerdo con

las características de diseño, estos pueden presentar diferentes sistemas nanoestructurados destinados a mejorar la disponibilidad y estabilidad de nutrientes en los cultivos. Entre ellos se encuentran formulaciones basadas en matrices nanoporosas, emulsiones a escala nanométrica y estructuras encapsuladas que permiten regular y eficientar su liberación en el suelo (Saurabh et al., 2024).

Fundamentalmente, la principal diferencia en su elaboración entre los NFs y los fertilizantes convencionales reside en la escala de síntesis. Los NFs se elaboran mediante un control atómico a escala nanométrica y los fertilizantes convencionales se procesan de forma masiva para obtener sales granuladas o cristalizadas a escala milimétrica.

TIPOS DE NANOFERTILIZANTES

Existen diversas clasificaciones, sin embargo, de acuerdo con el tipo de nutriente que transporta existe una clasificación de NFs: 1) basados en macronutrientes, y 2) a base de micronutrientes.

Los NFs que se diseñan con macronutrientes en la actualidad son el N, P, K y Ca, y se utilizan para maíz y trigo cultivos con alta demanda nutricional, o suelos degradados con susceptibilidad a la pérdida de nutrientes, por mencionar algunos se encuentra la nanourea, nanofosfatos de Ca y nanoK (Zhang et al., 2026).

Los NFs nitrogenados participan en procesos bioquímicos esenciales como la síntesis de proteínas, la actividad fotosintética y el crecimiento vegetativo (The et al. 2021). La nanourea constituye un ejemplo destacado de fuente de N a escala nanométrica, con una mayor superficie de interacción respecto a la urea convencional (Arora et al., 2024). Esta característica puede mejorar la disponibilidad del N y favorecer a un mayor contenido de clorofila (Kumar et al., 2025).

Los NFs con micronutrientes aportan elementos esenciales para las plantas como Fe, B, Mn, Zn, Cu y Mo. Aunque son requeridos en concentraciones menores, desempeñan funciones importantes en procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento y desarrollo. Sin embargo, la disponibilidad de estos elementos en el suelo puede verse limitada por factores como el pH, la humedad, la materia orgánica y las características del

suelo, lo que puede favorecer la aparición de deficiencias nutricionales en los cultivos (Basavegowda & Baek, 2021; Saurabh et al., 2024).

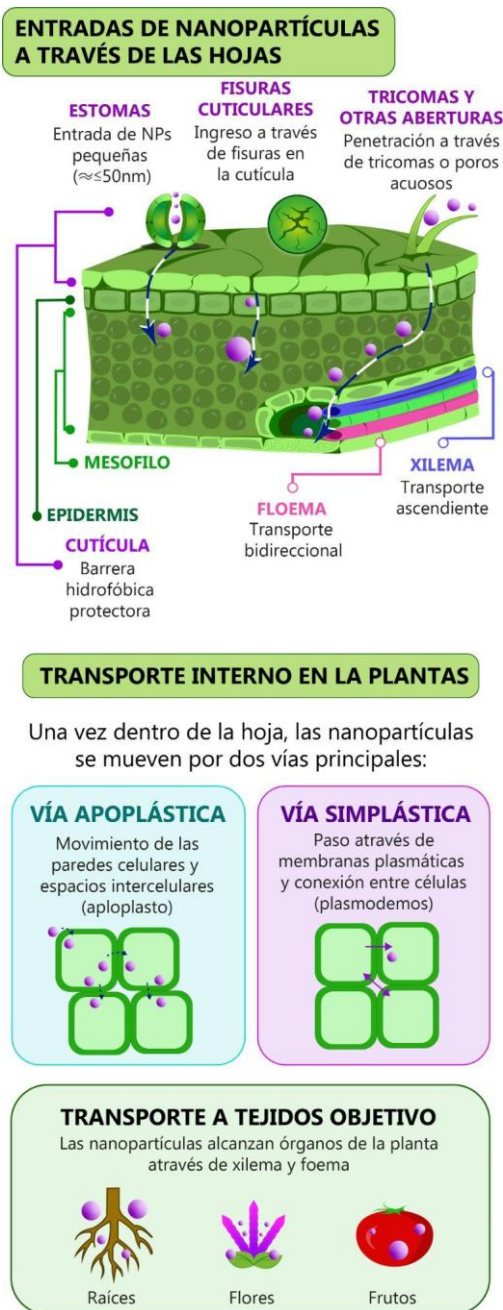


Figura 1. Mecanismos de acción y transporte de nutrientes de los nanofertilizantes en plantas vía foliar. Adaptación y rediseño en el software Adobe Illustrator a partir de una imagen gráfica generada mediante IA; contenido científico validado por Hong et al. (2021).

ABSORCIÓN DE NANOFERTILIZANTES

Los NFs se aplican de dos formas comúnmente en la agricultura: vía foliar y vía suelo. En cuanto a la vía foliar la penetración ocurre principalmente en las hojas a través de los estomas y se transportan por toda la planta mediante la vía apoplástica y simplástica (Hong et al., 2021). Además, también pueden ingresar por el tallo incluso a través de heridas en diferentes partes de la planta, interesantemente su penetración en la pared celular está influenciada por el diámetro de sus poros (5-20 nm) (Demeke et al., 2025). Por esta razón, los NFs con diámetro inferior al tamaño de los poros pueden atravesar esta barrera y acceder a los espacios intracelulares (Figura 1). Sin embargo, factores ambientales como humedad, temperatura, luz y precipitación pueden modificar la eficiencia de absorción, ya que influyen en la apertura estomática y en la retención de las nanopartículas sobre la superficie foliar (do Couto Junior et al., 2025).

En cuanto a la absorción por la raíz se ha reportado que los NFs con dimensiones aproximadas de 3 a 5 nm pueden favorecer su incorporación en la raíz mediante procesos asociados al movimiento del agua, gradientes de presión osmótica y transporte a través de las capas celulares externas, además, la pared celular de las células epidérmicas actúa como una barrera selectiva, debido a la presencia de espacios microscópicos que pueden restringir el paso de NFs de mayor tamaño (Ali et al., 2021). De acuerdo con Hanif et al. (2024), una vez absorbidas por las raíces, los NFs pueden movilizarse a través de la vía apoplástica y simplástica hasta alcanzar los tejidos vasculares facilitando la translocación mediante el xilema hacia los órganos aéreos (Figura 2).

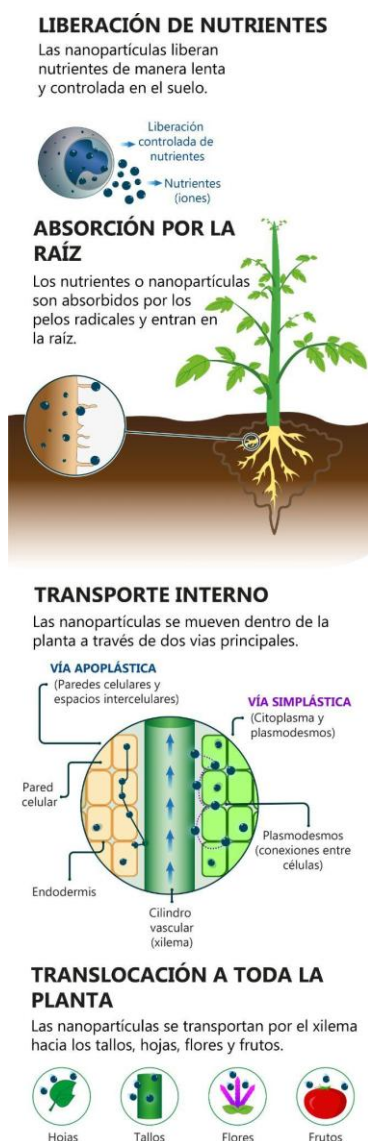


Figura 2. Mecanismos de acción y transporte de nutrientes de los nanofertilizantes en plantas vía suelo. Adaptación y rediseño en el software Adobe Illustrator a partir de una imagen gráfica generada mediante IA; contenido científico validado por Ali et al. (2021); Hanif et al. (2024).

Además, los NFs liberan nutrientes de forma gradual durante varias semanas, favoreciendo una mayor disponibilidad nutrimental en comparación con los fertilizantes convencionales (Verma et al., 2022).

Por otra parte, una vez en contacto con la rizosfera, estas nanoestructuras pueden favorecer la captación de nutrientes mediante diversos mecanismos, tales como la

interacción con compuestos liberados por las raíces, la modulación de rutas de transporte a través de membranas celulares y la utilización de procesos fisiológicos como la endocitosis o el paso mediante canales iónicos (Gupta et al., 2024). En conjunto, estos mecanismos podrían contribuir a una mayor eficiencia en la absorción y aprovechamiento de nutrientes por parte de las plantas.

NANOFERTILIZANTES EN LA AGRICULTURA MODERNA

Los NFs presentan diversas ventajas frente a los fertilizantes convencionales, destacando su capacidad para mejorar la eficiencia en la entrega de nutrientes debido a sus características a escala nanométrica permitiendo que permanezcan disponibles durante mayor tiempo en la zona de absorción de la planta (Babu et al., 2022). Además, se considera que su aplicación tiene capacidad como biofortificador de cultivos, ya que favorecen la disponibilidad y absorción de nutrientes esenciales. Sin embargo, la aplicación de diversos nanofertilizantes mediante tratamientos al suelo o aspersión foliar han sido evaluados experimentalmente, incluyendo nano-urea, nano-ZnO, nano-Mo, nano-Cu/CuO, nano-Si, entre otros. Su aplicación ha mostrado efectos sobre variables como el crecimiento, rendimiento y absorción de nutrientes en diferentes cultivos, entre ellos arroz, trigo, maíz y diversas hortalizas (Channab et al., 2024; Hussain Hadri et al., 2024; Mehta et al., 2024).

El uso de NFs contribuye a reducir las pérdidas de nutrientes en el suelo y su transporte hacia sistemas acuáticos, disminuyendo el impacto ambiental asociado con la acumulación excesiva de compuestos nitrogenados y fosfatados, los cuales pueden favorecer procesos como la eutrofización (Gade et al., 2023).

Además, los NFs pueden favorecer procesos biológicos importantes dentro del agroecosistema, como la dinámica del nitrógeno, la actividad enzimática y la interacción con microorganismos promotores del crecimiento vegetal. Se ha reportado que algunas nanopartículas metálicas pueden favorecer la presencia de microorganismos benéficos en la rizosfera, como bacterias fijadoras de nitrógeno y bacterias promotoras del crecimiento vegetal (Kalwani et al., 2022) y, por ende, incrementar la productividad agrícola.

De acuerdo con todo lo anterior y a lo reportado en la literatura mundial el uso de NFs en la agricultura convencional es viable y técnicamente funcional. Su uso reduce dosis, mejora la eficiencia de los nutrientes, poca pérdida por lixiviación y disminuye el impacto ambiental. En la actualidad, a nivel comercial su éxito radica en productos mezclados que combina insumos convencionales potenciados con nanomateriales.

NANOFERTILIZANTES Y SU EFECTO EN LA SALUD DEL SUELO

La aplicación de NFs con nutrientes esenciales pueden modificar la actividad microbiana en la rizosfera, estimulando procesos enzimáticos y la producción de compuestos como exopolisacáridos y metabolitos secundarios, los cuales favorecen la relación planta-microorganismo (Semenova et al., 2024). Asimismo, algunos nanomateriales pueden modificar características como la estructura del suelo, porosidad y capacidad de retención de agua, generando condiciones más favorables para el establecimiento y crecimiento vegetal. Entre ellos, las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO), óxido de magnesio (MgO) y sílice (SiO₂) han mostrado potencial para mejorar la fertilidad del suelo al favorecer la disponibilidad de nutrientes y estimular procesos relacionados con los ciclos biogeoquímicos en el suelo (do Couto Junior et al., 2025).

Sin embargo, la dosificación adecuada de los NFs es un aspecto clave, debido a que una aplicación excesiva puede alterar las propiedades fisicoquímicas del suelo, afectar la microbiota y provocar efectos fitotóxicos en las plantas (Babu et al., 2022).

DESAFIOS REGULATORIOS, RIESGOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS DE LOS NANOFERTILIZANTES

Uno de los principales problemas de los NFs en el mundo es que los sistemas de regulaciones aún están en desarrollo y en México particularmente no existen regulaciones de la nanotecnología en todas las áreas de la ciencia incluida la agricultura, lo que genera incertidumbre sobre su seguridad y su eficacia. En este contexto, las regulaciones ya existentes en países desarrollados necesitan fortalecimiento para evaluar los riesgos y el ciclo de vida, que incluya las etapas de

síntesis, aplicación en la agricultura, hasta su degradación y disposición final (Zhang et al., 2026). Lo anterior, debido a que los NFs aplicados en la agricultura tiene importantes beneficios, sin embargo, sus propiedades fisicoquímicas pueden generar efectos tóxicos, por lo tanto, es necesario evaluar su seguridad con estudios de toxicidad que permitan identificar los riesgos para los ecosistemas y la salud humana (Santos et al., 2024).

Aunque se ha considerado un avance tecnológico con alto potencial debido a su capacidad para mejorar la eficiencia del uso de nutrientes, aún existen incertidumbres relacionadas con sus posibles efectos adversos a largo plazo en los sistemas agrícolas.

No obstante, no existe un protocolo estandarizado para evaluar los NFs, debido a que presentan muchas propiedades fisicoquímicas y se ha optado por adaptar protocolos de otras sustancias químicas como los fármacos (Shelar et al., 2023). En este sentido, es urgente trabajar en las regulaciones, protocolos de estandarización que puedan respaldar el uso de los NFs como una tecnología sustentable.

Por otro lado, un desafío para la adopción de los NFs por parte de pequeños productores está relacionado con su costo elevado, además que en zonas rurales los NFs pueden ser más difícil de conseguir, lo que complicaría aún más en términos de costos y podría dificultar su implementación a gran escala (Mim et al., 2025).

Desde nuestra perspectiva, y debido a que en la actualidad no hay marcos regulatorios de la nanotecnología en México, se podría empezar por implementarlo de forma adaptativa, y que se enfoque a la prevención de los riesgos. Por ejemplo, la primera etapa de regulación consideramos que debe ser el registro y la caracterización de los nanomateriales, esto ayudaría a tener conocimiento de los nanomateriales que circulan en el mercado nacional. En una segunda etapa podría ser el etiquetado de los productos con las características básicas de los nanomateriales (tipo, tamaño, forma, toxicidad). Y una tercera etapa sería la implementación de Normas Oficiales Mexicanas obligatorias para proteger a trabajadores expuestos a nanomateriales en la industria, laboratorios y en los campos de aplicación.



CONCLUSIÓN

Los NFs representan una de las estrategias más relevantes para incrementar la eficiencia de la fertilización y promover una agricultura más sostenible. Sus propiedades fisicoquímicas, favorecen una liberación controlada de nutrientes, una mayor absorción y translocación a través de aplicaciones foliares o al suelo optimizando el aprovechamiento de macro y micronutrientes por las plantas. Como consecuencia, su uso se ha documentado con mejoras en el crecimiento, el rendimiento, la biofortificación de los cultivos y la eficiencia en el uso de nutrientes, además de contribuir a reducir el impacto ambiental. Sin embargo, aún es necesario profundizar en el conocimiento de los mecanismos de interacción entre los NFs, las plantas y los microorganismos del suelo, así como evaluar sus efectos a largo plazo sobre la salud del suelo y el ambiente. Esta información permitirá establecer estrategias regulación y de manejo que favorezcan una adopción segura y eficiente de los NFs dentro de los sistemas agrícolas modernos.

Agradecimientos

Proyecto TecNM - Proyectos de investigación 2025-2026 (clave: 25377.26-P).

SECIHTI - Beca estudios de posgrado a Sheyla Paola Pérez de los Santos (CVU: 2211658).

SECIHTI - Beca postdoctoral a Magín González-Moscoso MOD.ORD.11/2025.

Literatura citada

- Ali, S., Mehmood, A., & Khan, N. (2021). Uptake, translocation, and consequences of nanomaterials on plant growth and stress adaptation. *Journal of Nanomaterials*, 6677616. <https://doi.org/10.1155/2021/6677616>
- Al-Mamun, M. R., Hasan, M. R., Ahommed, M. S., Bacchu, M. S., Ali, M. R., & Khan, M. Z. H. (2021). Nanofertilizers towards sustainable agriculture and environment. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101658. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101658>
- Arora, P. K., Tripathi, S., Omar, R. A., Chauhan, P., Sinhal, V. K., Singh, A., Srivastava, A., Garg, S. K., & Singh, V. P. (2024). Next-generation fertilizers: The impact of bionanofertilizers on sustainable agriculture. *Microbial Cell Factories*, 23, 254. <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02528-5>
- Babu, S., Singh, R., Yadav, D., Rathore, S. S., Raj, R., Avasthe, R., Yadav, S. K., Das, A., Yadav, V., Yadav, B., Shekhawat, K., Upadhyay, P. K., Yadav, D. K., & Singh, V. K. (2022). Nanofertilizers for agricultural and environmental sustainability. *Chemosphere*, 292, 133451. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133451>
- Basavegowda, N., & Baek, K.-H. (2021). Current and future perspectives on the use of nanofertilizers for sustainable agriculture: The case of phosphorus nanofertilizer. *3 Biotech*, 11(7), 357. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02907-4>
- Bastakoti, B., Eneh, N., & Singh, H. P. (2026). Nanofertilizers: A new era in sustainable agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research*, 27, 102793. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2026.102793>
- Channab, B., El Idrissi, A., Ammar, A., Dardari, O., Marrane, S. E., El Gharrak, A., Akil, A., Essemlali, Y., & Zahouily, M. (2024). Recent advances in nano-fertilizers: Synthesis, crop yield impact, and economic analysis. *Nanoscale*, 16, 4484–4503. <https://doi.org/10.1039/D3NR05012B>
- do Couto Junior, M. C., da Silva, L. I., Ribeiro, M. de S., Dambroz, C., e Bufalo, T. C., Gomes, M. P., & Dória, J. (2025). Nanofertilizers in modern agriculture: A technological revolution in plant nutrition and resource efficiency. *ACS Omega*, 10(48), 58057–58071. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c08087>
- Demeke, E. D., Benti, N. E., Terefe, M. G., Anbessa, T. T., Mengistu, W. M., & Mekonnen, Y. S. (2025). A comprehensive review on nano-fertilizers: Preparation, development, utilization, and prospects for sustainable agriculture in Ethiopia. *Nanoscale Advances*, 7(8), 2131–2144. <https://doi.org/10.1039/d4na01068j>
- FAO. (2024). The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gade, A., Ingle, P., Nimbalkar, U., Rai, M., Raut, R., Vedpathak, M., Jagtap, P., & Abd-Elsalam, K. A. (2023). Nanofertilizers: The next generation of agrochemicals for long-term impact on sustainability in farming systems. *Agrochemicals*, 2(2), 257–278. <https://doi.org/10.3390/agrochemicals2020017>



- González-Feijoo, R., Martínez-Castillo, C., Rodríguez-Seijo, A., Pérez-Rodríguez, P., & Arenas-Lago, D. (2024). Nanoagrochemicals versus conventional fertilizers: A field case study with tailor-made nanofertilizers for sustainable crop efficiency of *Brassica oleracea* L. convar. Capitata var. Sabauda. *Agronomy*, 14(9), 1885. <https://doi.org/10.3390/agronomy14091885>
- Goyal, A., Chavan, S. S., Mohite, R. A., Shaikh, I. A., Chendake, Y., & Mohite, D. D. (2025). Emerging trends and perspectives on nano-fertilizers for sustainable agriculture. *Discover Nano*, 20, 97. <https://doi.org/10.1186/s11671-025-04286-8>
- Gupta, S., Gupta, G. S., Madheshiya, P., Mishra, A. K., & Tiwari, S. (2024). Nano fertilizers for sustaining future farming: A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 62, 103446. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103446>
- Hanif, S., Javed, R., Cheema, M., Kiani, M. Z., Farooq, S., & Zia, M. (2024). Harnessing the potential of zinc oxide nanoparticles and their derivatives as nanofertilizers: Trends and perspectives. *Plant Nano Biology*, 10, 100110. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100110>
- Hong, J., Wang, C., Wagner, D. C., Gardea-Torresdey, J. L., He, F., & Rico, C. M. (2021). Foliar application of nanoparticles: Mechanisms of absorption, transfer, and multiple impacts. *Environmental Science: Nano*, 8(5), 1196–1210. <https://doi.org/10.1039/D0EN01129K>
- Humphreys, J., Lan, R., & Tao, S. (2021). Development and recent progress on ammonia synthesis catalysts for Haber–Bosch process. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2(1), 2000043. <https://doi.org/10.1002/aesr.202000043>
- Hussain Hadri, S., Afzaal, A., Saeed, L., Arshad, A., Nazeer, S., & Akram, M. (2024). Recent advances in the development of nanoparticle based fertilizers for different kinds of crops: A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 58, 103194. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103194>
- Joudeh, N., & Linke, D. (2022). Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: A comprehensive review for biologists. *Journal of Nanobiotechnology*, 20, Article 262. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01477-8>
- Kalwani, M., Chakdar, H., Srivastava, A., Pabbi, S., & Shukla, P. (2022). Effects of nanofertilizers on soil and plant-associated microbial communities: Emerging trends and perspectives. *Chemosphere*, 287(Part 2), 132107. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132107>
- Kumar, M., Velu, G., Subramanian, M., Pandian, K., Arunachalam, L., Golla, G., Ganeshan, S., Rajasekaran, R., Nallusamy, S., & Mustaffa, M. R. A. F. (2025). ¹⁵N-isotope tracing reveals enhanced nitrogen uptake, assimilation and physiological response from Nano urea in maize. *NanoImpact*, 40, 100592. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2025.100592>
- Manzoor, N., Ali, L., Ahmed, T., Noman, M., Adrees, M., Shahid, M. S., Ogunyemi, S. O., Radwan, K. S. A., Wang, G., & Zaki, H. E. M. (2022). Recent advancements and development in nano-enabled agriculture for improving abiotic stress tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science*, 13, 951752. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.951752>
- Mehta, S., Thakur, A., Kurbah, I., Chauhan, N., & Thakur, R. (2024). Nanotechnology in plant nutrition: Ensuring sustainable agriculture through nanofertilizers. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 187(5), 589–603. <https://doi.org/10.1002/jpln.202300288>
- Mim, J. J., Rahman, S. M. M., Khan, F., Paul, D., Sikder, S., Das, H. P., Khan, S., Orny, N. T., Shuvo, M. R. H., & Hossain, N. (2025). Towards smart agriculture through nano-fertilizer: A review. *Materials Today Sustainability*, 30, 101100. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101100>
- Nongbet, A., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K., Mahanta, S., Ray, M. K., Khan, M., Baek, K.-H., & Chakrabartty, I. (2022). Nanofertilizers: A smart and sustainable attribute to modern agriculture. *Plants*, 11(19), 2587. <https://doi.org/10.3390/plants11192587>
- Priya, E., Sudipta, S., & Pradip, K. M. (2024). A review on slow-release fertilizer: Nutrient release mechanism and agricultural sustainability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12, 113211. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113211>
- Santos, P. A., Biraku, X., Nielsen, E., Ozketen, A. C., Ozketen, A. A., & Hakki, E. E. (2024). Agricultural nanotechnology for a safe and sustainable future: Current status, challenges, and beyond. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 105(6), 3159–3169. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13922>



- Saurabh, K., Prakash, V., Dubey, A. K., Ghosh, S., Kumari, A., Sundaram, P. K., Jeet, P., Sarkar, B., Upadhyaya, A., Das, A., Kumar, S., Makarana, G., Kumar, U., Kumar, A., & Singh, R. R. (2024). Enhancing sustainability in agriculture with nanofertilizers. *Discover Applied Sciences*, 6(11), 559. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06267-5>
- Semenova, N. A., Burmistrov, D. E., Shumeyko, S. A., & Gudkov, S. V. (2024). Fertilizers based on nanoparticles as sources of macro- and microelements for plant crop growth: A review. *Agronomy*, 14(8), 1646. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081646>
- Shelar, A., Nile, S.H., Singh, A.V. Rothenstein, D., Bill, J., Xiao J., Chaskar, M, Kai, G., Patil R. (2023). Recent A Advances in Nano-Enabled Seed Treatment Strategies for Sustainable Agriculture:Challenges, Risk Assessment, and Future Prospects. *Nano-Micro Lett.* 15, 54 <https://doi.org/10.1007/s40820-023-01025-5>
- Swain, S., Sukla, L. B., & Samal, D. P. K. (2026). Revolutionizing agroecosystems through next-generation bio-nanofertilizers: An overview toward sustainable agriculture. *Nanoscale Advances*, 8(7), 2138–2158. <https://doi.org/10.1039/D6NA00006A>
- The, S. V., Snyder, R., & Tegeder, M. (2021). Targeting nitrogen metabolism and transport processes to improve plant nitrogen use efficiency. *Frontiers in Plant Science*, 11, 628366. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.628366>
- United Nations. (2022). *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. United Nations Department of Economic and Social Affairs.
- Upadhyay, Y., Dey, A., Singh, V.K., Dwivedi, B.S., Singh, R.K., Rajanna, G.A., Babu, S., Rathore, S.S., Shekhawat K., Rai, P.K., Choudhury, N.K., Budhlakoti, N., Mishra, D., Rai, A., Singh, A., Bhardwaj, A.K., Shukla, K. (2024). Nitrogen and zinc nanofertilizers improve nutrient use efficiency and crop performance. *Scientific Reports*, 14, 1820. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48951-3>
- Verma, K. K., Song, X.-P., Joshi, A., Rajput, V. D., Singh, M., Sharma, A., Singh, R. K., Li, D.-M., Arora, J., Minkina, T., & Li, Y.-R. (2022). Nanofertilizer possibilities for healthy soil, water, and food in future: An overview. *Frontiers in Plant Science*, 13, 865048. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.865048>
- Zhang, J., Zhang, T., & Rui, Y. (2026). From nanomaterials to nanofertilizers: Applications, ecological risks, and prospects for sustainable agriculture. *Plants*, 15(3), 415. <https://doi.org/10.3390/plants15030415>

Aviso legal/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son exclusivamente de los autores y colaboradores, y no de Agraria ni de sus editores. Agraria y sus editores no se responsabilizan de ningún daño a personas o bienes que resulte de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.

