

Nanotecnología en la agricultura: Innovación para la producción sostenible de alimentos

Nicol Edith Navarro López

Universidad Politécnica de Chiapas

nicoledithnavarro@gmail.com

Aleida Montserrat González Torrez

Universidad Politécnica de Chiapas

aleidamontserrat17@gmail.com

Arlett Esmeralda Pérez Pérez

Universidad Politécnica de Chiapas

esme2908perez@gmail.com

Nicolás Morales Mazariego

Universidad Politécnica de Chiapas

n941818@gmail.com

Magin González Moscoso

Universidad Politécnica de Chiapas

magingonmos@gmail.com

Resumen

La nanotecnología está revolucionando la agricultura moderna al ofrecer soluciones innovadoras a desafíos como el crecimiento demográfico, el cambio climático y la necesidad de mejorar la eficiencia en la producción de alimentos. Este artículo explora cómo la manipulación de materiales a escala nanométrica aplicados a la agricultura puede mejorar la productividad, la calidad de los cultivos y gestionar de manera sostenible los recursos naturales. Además, se destacan aplicaciones prometedoras como los nanosensores para la vigilancia de cultivos y el control de plagas, subrayando su potencial para modernizar y sostener el sector agrícola con numerosos beneficios para la producción de alimentos y la seguridad alimentaria global.

Palabras clave

Nanotecnología, agricultura, nanosensores.

Abstract

Nanotechnology is revolutionizing modern agriculture by offering innovative solutions to challenges such as population growth, climate change, and the need to improve food production efficiency. This article explores how the manipulation of materials at the nanometer scale applied to agriculture can enhance productivity, crop quality, and sustainably manage natural resources. It also highlights promising applications such as nanosensors for crop monitoring and pest control, emphasizing its potential to modernize and support the agricultural sector, with significant benefits for food production and global food security.

Keywords

Nanotechnology, agriculture, nanosensors.

APA: Navarro, N. E., González, A.M., Morales, N. y Pérez, E. A. (2024). Nanotecnología en la agricultura: Innovación para la producción sostenible de alimentos. *Azcatl*, 3, 23-27. DOI: [10.24275/AZC2024B005](https://doi.org/10.24275/AZC2024B005)

Introducción

En las sociedades industrializadas del primer mundo, la creciente demanda de alimentos de calidad impulsa a la industria agroalimentaria a producir alimentos seguros, nutritivos y saludables (Prieto *et al.*, 2008). Simultáneamente, los países en desarrollo también presentan un incremento en la demanda de este tipo de alimentos. Hechos que han motivado esfuerzos locales y globales para mejorar los estándares de producción, distribución y consumo de alimentos en estas regiones.

¿Qué es la nanotecnología?

La nanotecnología implica la manipulación de la materia a escala atómica y molecular para crear materiales, estructuras y dispositivos con propiedades únicas debido a su tamaño reducido (Rao *et al.*, 2006). Esta tecnología multidisciplinaria tiene aplicaciones en diversos campos como la medicina, la electrónica, la energía y, notablemente, la agricultura.

¿Qué relación tiene la nanotecnología con la agricultura?

En la Edad Moderna la agricultura enfrenta desafíos cada vez más complejos debido al crecimiento demográfico, al cambio climático y a la necesidad de mejorar la eficiencia en la producción de alimentos. En este contexto, la nanotecnología emerge como un campo prometedor que ofrece soluciones innovadoras y transformadoras para abordar estos problemas. A través de la manipulación de materiales a escala nanométrica, la nanotecnología proporciona herramientas que pueden revolucionar diversos aspectos de la agricultura, desde la mejora de la productividad y la calidad de los cultivos hasta la gestión sostenible de recursos naturales. Por ejemplo, se han diseñado nanofertilizantes que permiten una liberación controlada de nutrientes, lo que mejora la absorción por parte de las plantas y reduce el uso excesivo de fertilizantes convencionales, disminuyendo así la contaminación del suelo y del agua (Chen y Yada, 2011). De igual manera, el uso de nanopesticidas puede ofrecer una protección más efectiva y específica contra plagas, minimizando la cantidad de productos químicos utilizados (Nair *et al.*, 2010). Cu-

riosamente, los nanomateriales también se están usando como recubrimientos en alimentos provenientes de los campos agrícolas con el objetivo de aumentar su vida poscosecha y antifúngica.

Métodos de síntesis de nanomateriales y nanopartículas

Los métodos para sintetizar nanopartículas se clasifican típicamente con base en dos enfoques: de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba (Rao *et al.*, 2006). El primero implica la reducción de materiales más grandes a escala nanométrica, mientras que el segundo implica la construcción de nanopartículas a partir de átomos o moléculas en soluciones o fase gaseosa (como se muestra en la Figura 1). Igualmente, existen métodos químicos, físicos y verdes para obtener nanomateriales y dentro de cada uno hay diferentes técnicas que están reportadas a nivel mundial.

Comprender los métodos de síntesis de nanopartículas es crucial porque éstos no sólo determinan las características estructurales y morfológicas de las partículas, sino que también permiten controlar sus propiedades funcionales, como la reactividad superficial, la estabilidad y las propiedades ópticas o magnéticas. Estas propiedades son sustanciales para mejorar el rendimiento de las nanopartículas en aplicaciones tecnológicas y científicas, desde el desarrollo de nuevos materiales hasta su uso en la biomedicina. La elección del método de síntesis influye en la

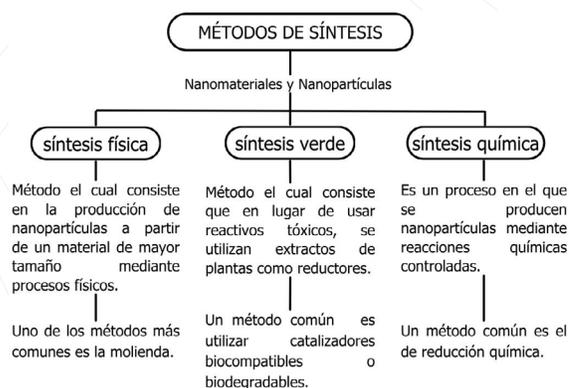


Figura 1. Diagrama de descripción de los métodos de síntesis de nanopartículas. Fuente: elaboración propia.

reproducibilidad del proceso, la uniformidad del producto final y la posibilidad de escalar la producción para satisfacer demandas industriales. El conocimiento profundo de estos métodos facilita la innovación en el diseño de partículas con funciones específicas, lo que permite avanzar en la nanotecnología aplicada a diversas áreas, asimismo, este conocimiento es primordial para abordar aspectos relacionados con la toxicidad y el impacto ambiental, coadyuvando a desarrollar nanopartículas más seguras y sostenibles (Rodríguez y Pérez, 2022).

Aplicaciones en la agricultura: Vía foliar, semilla y raíz

Como hemos visto, la nanotecnología se puede implementar de manera significativa en la agricultura y la producción de alimentos. Por ejemplo, el uso de nanosensores permite una vigilancia precisa del crecimiento de los cultivos y un control efectivo de plagas, aparte de facilitar la identificación temprana de enfermedades en animales y plantas. Estos nanosensores no sólo ayudan a mejorar la producción y seguridad de los alimentos, sino que también actúan como dispositivos de control externo que no terminan impregnados en los alimentos (Noormans, 2010). Por otro lado, se han hecho estudios sobre las aplicaciones de nanopartículas de óxido de zinc que han contribuido a un mayor crecimiento y producción de biomasa seca en plantas como el pimiento morrón (*Cap-sicum annum*). Se cree que este crecimiento podría estar relacionado con la influencia que tiene el zinc como precursor en la síntesis de las hormonas vegetales llamadas auxinas, pues estas hormonas tienen funciones cruciales en el desarrollo y la vida de las plantas (Kiolinko, 2023) que participan en la división celular, así como por su influencia en la reactividad del ácido indolacético, el cual sirve como fitoestimulante hormonal. De acuerdo con Ali et al. (2024), un fitoestimulante hormonal es un mensajero químico esencial que promueve el crecimiento y desarrollo de las plantas mediante la regulación de sus procesos fisiológicos.

El zinc desempeña un papel fundamental en la reactividad del ácido indolacético, una de las principales auxinas en las plantas, ya que actúa como un cofactor en diversas

enzimas involucradas en el metabolismo y la señalización del ácido indolacético. La presencia adecuada de zinc es esencial para la correcta síntesis, transporte y activación de esta hormona. De igual manera, el zinc influye en la estabilidad del ácido indolacético y en su capacidad para promover el crecimiento celular y la formación de raíces. La deficiencia de zinc puede afectar la actividad de las auxinas, lo que se traduce en una reducción del crecimiento y desarrollo vegetal, comprometiendo procesos como la elongación celular y la división celular en las raíces y los brotes (Roberts y Smith, 2021).

Sin embargo, el uso de ZnO presenta ciertas limitaciones. Las nanopartículas químicamente sintetizadas, especialmente en concentraciones elevadas, pueden disminuir la tasa de germinación o incluso resultar fitotóxicas para algunas variedades. Los efectos beneficiosos dependen de la compatibilidad biológica y la distribución de tamaño de las nanopartículas, lo que implica que se requieren estudios adicionales para ajustar sus dosis y métodos de aplicación en distintos cultivos y condiciones (Galindo et al., 2023).

Con estos ejemplos podemos darnos cuenta como las nanopartículas y nanomateriales ofrecen múltiples aplicaciones en la agricultura. Existen tres vías a través de las cuales se pueden aplicar estos nanomateriales para que sean absorbidos por las plantas (Figura 2). A continuación se describen cada una de ellas:

- Vía foliar: Aplicación directa de nanopartículas sobre las hojas de las plantas para mejorar su nutrición, como protección contra plagas y enfermedades y para incrementar la eficiencia en el uso de recursos.
- Vía semilla: Recubrimiento de semillas con nanopartículas para mejorar la germinación, resistencia a enfermedades y absorción de nutrientes, aparte de la entrega de nutrientes esenciales durante la germinación y desarrollo inicial.
- Vía raíz: Uso de nanopartículas para mejorar la estructura del suelo y aumentar la disponibilidad de agua y nutrientes para las raíces, lo que da como resultado una mejor eficiencia en el uso del agua y

resistencia al estrés. Además, generan una bioestimulación del crecimiento radicular (la radícula constituye la primera raíz rudimentaria en el embrión) (Sánchez, 2021).



Figura 2. Vías de aplicación de nanopartículas en plantas en la agricultura. Fuente: elaboración propia.

Dos desafíos en la agricultura: aumento poblacional y cambio climático

Se estima que la población mundial alcanzará los 9 700 millones de personas en el 2050, lo que requerirá un aumento significativo en la producción de alimentos (Servin y White, 2016). Este fenómeno es proporcional: conforme la población crece, la demanda de alimentos también aumenta. El problema que deriva de esta situación es el abuso de los recursos naturales del planeta, lo que impacta negativamente en el suelo, el agua y nuestros bosques.

La nanotecnología ofrece soluciones para maximizar la productividad de los cultivos en áreas limitadas mediante técnicas de entrega eficiente de nutrientes y pesticidas. Esto es crucial para satisfacer la creciente demanda alimentaria sin necesidad de expandir la frontera agrícola, preservando así los bosques y otros ecosistemas.

Por otro lado, la consecuencia del cambio climático que más afecta a la agricultura es la mayor frecuencia de fenómenos extremos, como sequías e inundaciones, esto debido a la alteración de los patrones climáticos. En este

contexto, la nanotecnología aporta a la agricultura climáticamente inteligente mediante el desarrollo de cultivos más resistentes a las condiciones adversas y la mejora en la gestión del agua y nutrientes. Por ejemplo, el uso de sensores nanobioquímicos en los campos agrícolas puede proporcionar información en tiempo real sobre las condiciones del suelo y las necesidades hídricas de las plantas, lo que permite una gestión más eficiente del agua, un recurso crítico en la adaptación al cambio climático (Golmei *et al.*, 2024). Esta información precisa facilita la toma de decisiones, optimizando el riego y la aplicación de fertilizantes, lo que resulta en un uso más racional del agua y una reducción en el uso de productos químicos agrícolas.

Nanotecnología: Una tecnología con varias limitantes

Aunque la nanotecnología tiene un potencial significativo, igualmente enfrenta varias limitaciones. En primer lugar, la producción y aplicación de nanopartículas en la agricultura aún puede ser costosa, lo que dificulta su adopción generalizada en países en desarrollo (Ghormade *et al.*, 2011). La literatura científica demuestra los efectos positivos en diversos cultivos en estudios de invernadero y en condiciones de laboratorio, sin embargo, una gran limitante de esta tecnología es su escalamiento a procesos industriales, lo que dificulta, por el momento, aplicarla en amplias extensiones de cultivos.

Asimismo, existe una creciente preocupación sobre los posibles efectos ambientales y las afectaciones en la salud que podrían derivarse de la liberación de nanopartículas en el entorno. La falta de estudios a largo plazo sobre la toxicidad de estas partículas en los ecosistemas y en la salud humana es una barrera considerable para su aceptación y regulación (Nair *et al.*, 2010).

Actualmente, la legislación sobre el uso de nanotecnología en la agricultura varía significativamente entre países. La Unión Europea, por ejemplo, tiene regulaciones estrictas para la evaluación de riesgos y la aprobación de nanopartículas en productos agrícolas; mientras que en otras regiones, como América Latina, las normativas son menos estrictas (Chen y Yada, 2011) o incluso no existen. Como en el caso de México, donde no se cuenta con una

normatividad vigente que regule el uso de los nanomateriales. Es muy importante que los gobiernos desarrollen marcos regulatorios sólidos que promuevan una innovación responsable, la protección del medio ambiente y la preservación de la salud humana.

Conclusiones

La integración de la nanotecnología en la agricultura representa un avance significativo para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la producción de alimentos. Los nanosensores y otras aplicaciones permiten un control preciso de las condiciones de cultivo, reduciendo los riesgos y mejorando los rendimientos agrícolas. Este avance no sólo coadyuva a la seguridad alimentaria global, sino que también promueve prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

Sin embargo, la adopción de esta tecnología debe ser cuidadosamente regulada para evitar posibles efectos adversos en la salud y en el entorno. La investigación continua y la implementación de políticas claras son fundamentales para garantizar que la nanotecnología contribuya de manera sostenible a la agricultura del futuro.

Referencias

- Ali, J., Mukarram, M., Ojo, J., Dawam, N., Riyazuddin, R., Ghramh, H. A., Khan, K. A., Chen, R., Kurjak, D. y Bayram, A. (2024). Harnessing phytohormones: Advancing plant growth and defence strategies for sustainable agriculture. *Physiologia Plantarum*, 176(3). <https://doi.org/10.1111/ppl.14307>
- Chen, H. y Yada, R. (2011). Nanotechnologies in agriculture: New tools for sustainable development. *Trends in Food Science & Technology*, 22(11), 585-594. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.07.002>
- Galindo, M., Flores, E. y Marszalek, J. E. (2023). Impact of biologically and chemically synthesized zinc oxide nanoparticles on seed germination and seedlings' growth. *Horticulturae*, 9(11), 1201. <https://doi.org/10.3390/horticulturae911201>
- Ghormade, V., Deshpande, M. V. y Paknikar, K. M. (2011). Perspectives for nano-biotechnology enabled protection and nutrition of plants. *Biotechnology Advances*, 29(6), 792-803. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.06.007>
- Golmei, L., Heisnam, P., Singh, A. P., Moirangthem, A. y Sahoo, S. (2024). Revolutionizing crop management with nanotechnology. *Just Agriculture*, 4(8). <https://justagriculture.in/2024/april/publications.html>
- Kirolinko, C. A. (2023). *Caracterización funcional de factores de transcripción asociados a la respuesta a auxinas en raíces de M. truncatula* [Tesis doctoral]. Universidad Nacional de La Plata.
- Nair, R., Varghese, S. H., Nair, B. G., Maekawa, T., Yoshida, Y. y Kumar, D. S. (2010). Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant Science*, 179(3), 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.04.012>
- Noormans, A. G. (2010). Impacto de la nanotecnología en la producción de alimentos. *Lámpsakos*, (4), 28-35.
- Prieto, M., Mouwen, J. M., López, S. y Cerdeño, A. (2008). Concepto de calidad en la industria agroalimentaria. *Interciencia*, 33(4), 258-261. https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S037818442008000400006&script=sci_abstract
- Rao, C. N. R., Müller, A. y Cheetham, A. K. (Eds.). (2006). *The chemistry of nanomaterials: Synthesis, properties and applications*. John Wiley & Sons.
- Roberts, C. y Smith, D. (2021). The role of micronutrients in plant hormone activity: A focus on zinc and auxins. *Plant Physiology Journal*, 32(3), 102-115.
- Rodríguez, A. y Pérez, L. (2022). Advances in nanoparticle synthesis and applications. *Journal of Nanotechnology and Materials Science*, 17(2), 45-67.
- Sánchez, J. (18 de enero de 2021). *Partes de la semilla y sus funciones*. Ecología Verde. <https://www.ecologiaverde.com/partes-de-la-semilla-y-sus-funciones-1973.html>
- Servin, A. y White, J. C. (2016). Nanotechnology in agriculture: Next steps for understanding, adoption, and implications. *Environmental Science & Technology*, 50(15), 7861-7870. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02114>