

Artículo de divulgación

La Nanotecnología: “nano aliados” de los cultivos frente al estrés hídrico

Nanotechnology: “nano allies” for crops under water stress

Lorena Silvestre-Castañeda ¹ , Yolanda González-García ² , Adalberto Benavides-Mendoza ^{3,8} , Fabián Pérez-Labrada ^{4,8} , Gregorio Cadenas-Pliego ⁵ , Ricardo Tighe-Neira ⁶ , Gonzalo Tortella ⁷ , Antonio Juárez-Maldonado ^{4,8,*} 

- ¹ Doctorado en Ciencias en Agricultura Protegida. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, 25315, México.
- ² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Noroeste, Campo Experimental Todos Santos, La Paz 23070, México.
- ³ Departamento de Horticultura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, 25315, México.
- ⁴ Departamento de Botánica. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, 25315, México.
- ⁵ Centro de Investigación en Química Aplicada. Saltillo 25294, México.
- ⁶ Universidad Católica de Temuco, Laboratorio de Fisiología y Biotecnología Vegetal, Departamento de Ciencias Agropecuarias y Acuícolas, Facultad de Recursos Naturales, Rudecindo Ortega, 02950, Temuco, Chile.
- ⁷ Centro de Excelencia en Investigación Biotecnológica aplicada al medio ambiente (CIBAMA), Facultad de Ing. y Ciencias, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile.
- ⁸ Laboratorio Nacional Conahcyt de Ecofisiología Vegetal y Seguridad Alimentaria (LANCEVSA). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, 25315, México.

* Autor para correspondencia: antonio.juarez@uaaan.edu.mx

Recibido:

4/06/2025

Aceptado:

11/05/2026

Publicado:

15/05/2026

RESUMEN

Ante el incremento poblacional la agricultura se ha visto en la necesidad de buscar alternativas eficientes y sostenibles para la producción de alimentos. Sumado a esto, los problemas ocasionados por los factores abióticos limitan la productividad de los cultivos. El estrés hídrico en los cultivos representa un desafío en la producción de alimentos, por lo que se requiere implementar estrategias que contrarresten este problema. La nanotecnología es una herramienta innovadora y útil para desarrollar plantas capaces de enfrentar el estrés abiótico. El uso de nanomateriales en la agricultura tiene la visión de impactar favorablemente mediante un suministro razonable. Por sus características nanométricas y un desplazamiento más eficiente, reduce las pérdidas de nutrientes, aumentan el rendimiento y ayuda a un uso eficiente del agua en los cultivos. Sin embargo, aún se desconocen los posibles alcances de la nanotecnología en los desafíos de la agricultura a largo plazo. Esta revisión busca distinguir una perspectiva de la aplicación de la nanotecnología como posible alternativa sostenible para la agricultura frente a desafíos abióticos.

Palabras clave: Estrés abiótico, nanomateriales, nanopartículas, agricultura sostenible, resiliencia de cultivos.



ABSTRACT

In the context of rapid population growth, agriculture has been compelled to seek efficient and sustainable alternatives for food production. In Addition, abiotic factors significantly limit crop productivity. Among these, water stress represents a major challenge, making it necessary to implement effective strategies to mitigate its impact. Nanotechnology has emerged as an innovative and promising tool for developing crops capable of coping with abiotic stress. The application of nanomaterials in agriculture is expected to have a positive impact through controlled and targeted delivery systems. Due to their nanoscale properties and enhanced mobility, nanomaterials can reduce nutrient losses, increase crop yields, and promote more efficient water use. However, the long-term implications and full potential of nanotechnology in addressing agricultural challenges remain largely unknown. This review aims to provide an overview of the application of nanotechnology as a potential sustainable alternative for agriculture in the face of abiotic challenges.

Keywords: Abiotic stress, nanomaterials, nanoparticles, sustainable agriculture, crop resilience.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático y el uso desmedido de los recursos naturales son factores que afectan el potencial de la productividad agrícola. Se estima que las pérdidas agrícolas ocasionadas por los factores abióticos son de hasta un 50% (Junaid et al., 2024). Uno de los desafíos que se ha derivado del cambio climático es un acceso limitado de agua, con un efecto de estrés hídrico en los cultivos. El estrés hídrico afecta negativamente el crecimiento de las plantas, manifestándose en menor altura de planta y bajos rendimientos. También, el estrés hídrico afecta al suelo y la movilidad de los nutrientes, disminuyendo la productividad agrícola (Biswas et al., 2025). La agronomía al ser un eje central de muchos países, busca alternativas con potencial para mejorar la productividad agrícola. Por lo que, la nanotecnología se ha considerado como una tecnología que combina técnicas agronómicas y que mejoran métodos convencionales para aumentar la productividad agrícola al ritmo deseado (Ansari et al., 2020). La agricultura ha combinado desarrollos biotecnológicos que potencien la productividad y prácticas encaminadas a mejorar la resiliencia de los sistemas agrícolas. Este enfoque pretende identificar áreas clave para futuras estrategias innovadoras, que enfrenten y minimicen los efectos negativos del cambio climático en la agricultura (Verma et al., 2024). El potencial de la nanotecnología se centra en la administración de nutrientes con precisión, con un impacto positivo en el crecimiento de las plantas, en la

resistencia a enfermedades y la adaptación de estrés abiótico. Así como, un éxito en la poscosecha; prolongando la calidad, frescura y vida útil de productos agrícolas en almacenamiento (Neme et al., 2021).

En la agricultura, los nanomateriales (NM) mejoran y optimizan los agroquímicos, utilizando sus propiedades de tamaño particular, la estructura de la superficie y su composición química (An et al., 2022). La nanotecnología busca promover la agricultura sostenible, mediante la aplicación de nanomateriales en forma de: nanofertilizantes, nanopesticidas, nanobiosensores, nanopartículas, etc. (usman et al., 2020). Su influencia en el ámbito de la agricultura, busca proyectarse al futuro de la agronomía a escala mundial (Ansari et al., 2020). Este escrito busca proporcionar información sobre el impacto de la nanotecnología sobre estrategias innovadoras que mejoren la resiliencia de los cultivos, con el fin de asegurar la productividad agrícola ante las condiciones adversas derivados del cambio climático.

LA NANOTECNOLOGÍA EN LA AGRICULTURA

Las prácticas modernas tienden a la degradación del medio ambiente, por lo que es necesario la innovación y modernización en la agricultura para satisfacer la demanda alimentaria y la sostenibilidad ambiental (Khan et al., 2022). La agricultura ha visto a la nanotecnología con potencial positivo en aplicaciones



agronómicas, así como, una herramienta para enfrentar factores bióticos y abióticos (Marchiol, 2018). La nanotecnología es la ciencia y tecnología de las cosas diminutas que miden menos de 100 nanómetros (Otles & Sahyar, 2018). Las propiedades ópticas y electroquímicas de estos materiales permiten la administración inteligente y específica de nutrientes a las plantas (Santos et al., 2024). La incorporación de agroquímicos basados en nanotecnología mejora el desarrollo de plantas y la producción agrícola, volviendo a la agricultura más sostenible con aplicaciones de nanopesticidas, nanofertilizantes, nanoformulaciones, nanopartículas y nanosensores (Khan et al., 2022). Los resultados prometedores en el control de exceso de insumos agrícolas y el mantenimiento del equilibrio ambiental (Chhipa, 2019), reflejan la eficiencia de los fertilizantes a escala nanométrica, debido a su capacidad de liberación controlada y la administración dirigida en comparación con aplicaciones convencionales; lo que hace posible un uso eficaz de la tecnología moderna (Manjunatha S. B. et al., 2016). Implementar nanotecnología en la agricultura permite mejorar la eficiencia de absorción de nutrientes y aumentar el rendimiento de los cultivos, por lo que puede contribuir a optimizar los recursos en los sistemas agrícolas (Atanda et al., 2025). Algunos estudios indican que en la postcosecha se pierde hasta un tercio de la producción agrícola, lo que impacta en la economía y comercialización (Jayasekhar Babu et al., 2022). Es importante considerar que los aspectos relacionados con la cadena de valor aun representan desafíos en la adopción de estas tecnologías (Neme et al., 2021).

Los nanofertilizantes son fertilizantes a una escala casi invisible (nanoescala), pueden suministrar uno o más nutrientes, aplicarse en combinación con otros fertilizantes o individuales; su objetivo es mejorar el crecimiento y la productividad de las plantas. Los nanopesticidas representan una solución atractiva a las formulaciones de pesticidas convencionales, debido a concentraciones más bajas y su superior solubilidad en agua, eliminando la necesidad de disolventes orgánicos. Dispositivos como: biosensores, nanobiosensores y nanosensores son utilizados para medir parámetros físicos, químicos y biológicos. Las nanopartículas son partículas diminutas con propiedades mejoradas, y aplicadas para resolver problemas de eficiencia y protección agrícola. La aplicación de nanotubos en la agronomía mejora el crecimiento de las plantas y la

eficiencia del uso de insumos, su liberación controlada mejora la absorción de nutrientes, por su tamaño pequeño puede llegar directamente a tejidos específicos (Santos et al., 2024). Las principales categorías y aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura se resumen en la Figura 1.

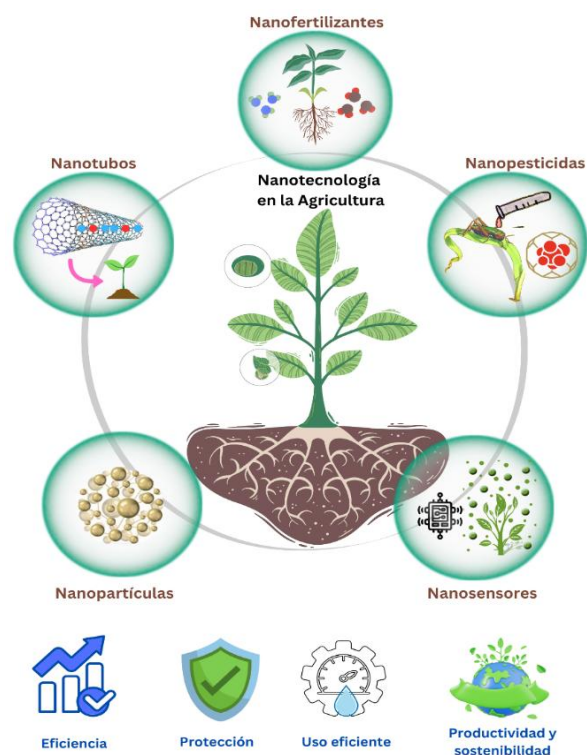


Figura 1. Principales aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura. Imagen diseñada por el autor mediante Canva (2026).

LOS NANOMATERIALES: TECNOLOGÍA APLICADA PARA ENFRENTAR EL ESTRÉS HÍDRICO EN LA AGRICULTURA

El estrés abiótico ocasionado por falta de agua es uno de los principales factores limitantes en la producción agrícola, ya que afecta procesos fisiológicos, como la fotosíntesis, el intercambio gaseoso y el crecimiento vegetal (Farooq et al., 2009). Las condiciones de estrés originan la producción de moléculas dañinas ROS (especies reactivas de oxígeno), que pueden causar un estrés interno en la célula (Zaman et al., 2025). Ante esta situación, la nanotecnología agrícola ha revolucionado debido a que ha implementado nanomateriales como

nanofertilizantes, aplicación de nanopartículas, nanoencapsulados, u otros materiales en escala nanométrica (Haydar et al., 2024). Las aplicaciones de estos nanomateriales pueden mitigar el daño interno en plantas provocado por el estrés. Esto lo hace mediante el control de las ROS y manteniendo el equilibrio dentro de sus células (Zaman et al., 2025). El estrés hídrico altera procesos metabólicos y fisiológicos en las plantas, desencadena la sobreproducción de ROS y altera el sistema de defensa de una planta (Raza et al., 2023).

Las propiedades únicas de los nanomateriales les permiten interactuar con las plantas a nivel celular y molecular, influyendo en los procesos fisiológicos y bioquímicos.

Estos materiales mejoran la absorción de nutrientes, el aprovechamiento de luz y la eficiencia en el uso de agua, además de contribuir a la desintoxicación de metales pesados en suelos contaminados. Así mismo, los NM inducen mecanismos de tolerancia frente al estrés abiótico, como sequía, salinidad y cambios de temperatura, a través de procesos fisiológicos y hormonales (Zaman et al., 2025). La producción excesiva de ROS induce estrés oxidativo al dañar lípidos, proteínas y ácidos nucleicos (Hasanuzzaman & Fujita, 2022). En este contexto, los NM han sido propuestos como estrategia para mitigar los efectos del estrés hídrico, al mejorar la eficiencia fisiológica y activar el sistema antioxidante en las plantas (Khalid et al., 2022).

MECANISMOS DE ABSORCIÓN Y TRANSLOCACIÓN DE NANOMATERIALES EN PLANTAS

La interacción entre nanomateriales y plantas ocurre a nivel molecular, estas interacciones están influenciadas por las transformaciones que experimentan los NM dentro de los sistemas biológicos, por lo que puede derivar en efectos fisiológicos beneficiosos como en respuestas fitotóxicas (Wei et al., 2024). Los nanomateriales, particularmente las nanopartículas, interactúan con las plantas modulando procesos: como la germinación, el crecimiento y la respuesta al estrés. Su absorción sucede a través de raíces, hojas y semillas, mientras que su traslocación se lleva a cabo principalmente mediante las vías apoplástica y simplástica. Los procesos se pueden determinar por las

propiedades fisicoquímicas de los NM y la especie vegetal, lo que influye en su distribución y efectos dentro de la planta (Djanaguiraman et al., 2024).

La interacción que existe entre la planta y los nanomateriales puede iniciar con la absorción a través de las raíces o las hojas de las plantas, posteriormente se transporta a través de diferentes tejidos (Oliveira et al., 2023). La Figura 2 ilustra como ocurren las vías de absorción y como una vez dentro de los tejidos los nanomateriales se transportan a través de los tejidos vasculares (xilema y floema) dependiendo de la aplicación y las propiedades de los nanomateriales.

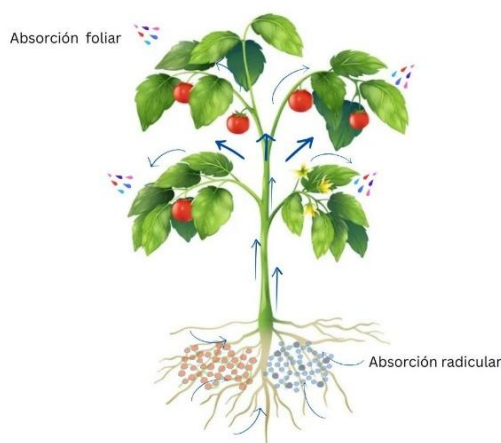
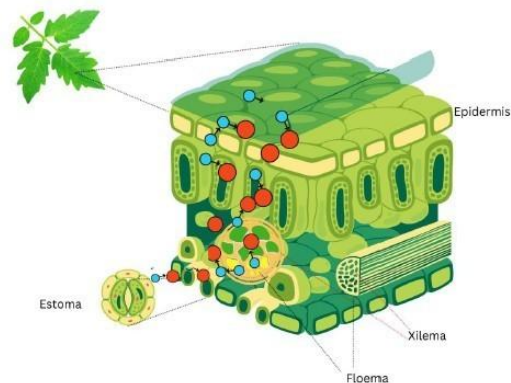


Figura 2. Vías de aplicación de nanomateriales en las plantas. Imagen diseñada por el autor mediante Canva (2025).

La absorción radicular es determinada por parámetros como la presión osmótica y la conductividad hidráulica, ocurre a través de las vías apoplástica (los nanomateriales se mueven a través de espacios de la pared celular) y la simplástica (entran al citoplasma y viajan a través de los plasmodesmos).

Una vez dentro de los tejidos radiculares, los NM llegan al sistema vascular y son transportados hacia arriba a través del xilema a las partes aéreas de la planta (hojas y flores). En la aplicación foliar los NM penetran la cutícula y los estomas de la hoja, entrando al floema para su distribución a tejidos no fotosintéticos como las raíces o los frutos (Figura 3).

A



B

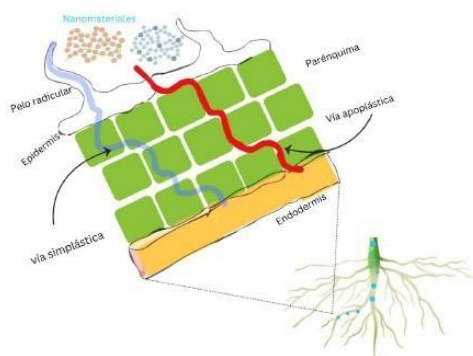


Figura 3. Vías de entrada de los nanomateriales a la planta. **A.** La entrada foliar puede ocurrir por la cutícula, por estomas o cortes en las hojas. **B.** La entrada por las raíces puede ocurrir por vía simplástica o apoplástica. Imagen diseñada por el autor mediante Canva (2025).

EL POTENCIAL DE LAS NANOPARTÍCULAS COMO BIOESTIMULANTES

En aplicaciones agronómicas las nanopartículas tienen perspectivas prometedoras por su nanoestructura (Harish et al., 2023), la cual permite la liberación controlada de compuestos y mejorar la absorción de nutrientes (Kumar et al., 2025). Así mismo su uso contribuye a la reducción de pérdidas postcosecha (Neme et al., 2021). Las nanopartículas pueden emplearse tanto como fertilizantes, estimulando el crecimiento vegetal, como formulaciones pesticidas donde la nanoencapsulación de agroquímicos favorece una liberación gradual, y una mayor eficiencia en el control de plagas (Tipu et al., 2021).

Por otra parte, los factores ambientales como las variaciones de temperatura, intensidad lumínica y la precipitación pueden generar condiciones adversas que provocan estrés hídrico en las plantas, afectando sus características morfológicas, fisiológicas y bioquímicas y reduciendo su rendimiento (Bashir et al., 2021; Seleiman et al., 2021). Frente a estas condiciones, las nanopartículas han demostrado la capacidad de mitigar los efectos del estrés abiótico mediante la activación de mecanismos como el sistema antioxidante, lo que contribuyen a mejorar la productividad agrícola (Sarraf et al., 2022). Este efecto se ilustra en la Figura 4 donde se muestra el impacto de la aplicación de nanopartículas en plantas bajo condiciones de estrés abiótico.

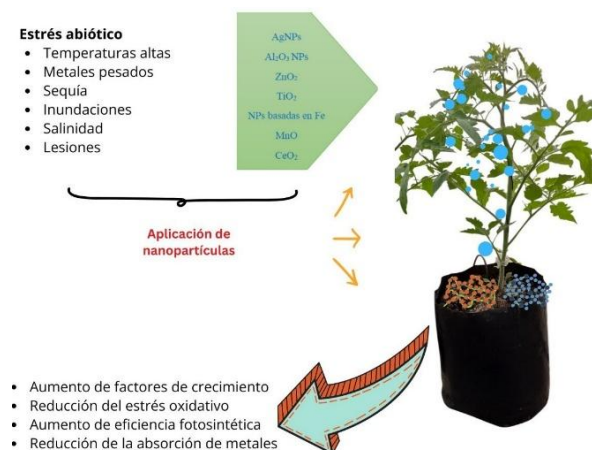


Figura 4. Efecto de aplicaciones de nanopartículas en planta bajo estrés abiótico. Imagen diseñada por el autor mediante Canva (2025).

Las aplicaciones exógenas de nanopartículas, ya sea por vía foliar o en el suelo, representa una estrategia prometedora para mejora de la productividad y el desarrollo de los cultivos tanto en condiciones normales como bajo un tipo de estrés. En este sentido, su aplicación puede estimular procesos morfofisiológicos en las plantas. No obstante, los efectos generados dependen de factores como el origen de las nanopartículas, su tamaño, concentración, la especie vegetal y el tiempo de exposición (Raza et al., 2023). Asimismo, el impacto de las nanopartículas puede ser tanto positivo como negativo para la salud de la planta y del suelo, por lo que resulta importante evaluar sus condiciones de uso. Ante esto, no se debe ignorar implicaciones a nivel fisiológico (Mgadi et al., 2024).

PERSPECTIVAS DE LOS NANOMATERIALES EN EL FUTURO DE LA AGRICULTURA

La nanotecnología es una forma novedosa para enfrentar la tensión ambiental, y lidiar con factores adversos de la agricultura, mediante dosis bajas de NM. Los NM tienen propiedades y estructuras físicas únicas, características novedosas que pueden contrarrestar el impacto del estrés mediante la aplicación de nanopartículas (Upasana Sahoo, 2022). Los NM deben someterse a conjuntos predefinidos de estudios para detectar la nanotoxicidad no deseada. Esta puede suceder debido a su tamaño, composición, agregación, cristalinidad y funcionalidad superficial (Santos et al., 2024). Aún existe cierta incertidumbre en la nanotecnología sobre el destino de los nanomateriales en la agricultura. Ya que, algunos aspectos solo se han considerado teóricamente, enfocándose en la evaluación de la utilidad de los nanomateriales en cuanto a su uso como nanofertilizantes y protección de plantas. Por ello se considera que las aplicaciones de los nanomateriales diseñados requieren de investigaciones más exhaustivas (Marchiol, 2018). Los requisitos regulatorios en desarrollo resultan ser rigurosos para las nanoformulaciones, esto por el destino y el peligro de los diferentes componentes (Kah & Kookana, 2020). Las impurezas provenientes del proceso de producción podrían desencadenar estrés oxidativo, genotoxicidad o amenazas cancerígenas para las plantas, animales y humanos. Así como afectar la salud del suelo y el medio ambiente. Por lo que, como toda tecnología novedosa se requiere prevenir riesgos; los nanomateriales deben someterse a procesos de caracterización para evaluar los riesgos para las plantas, el medio ambiente y animales (Santos et al., 2024).

CONCLUSIONES

El uso inteligente de aplicaciones de materiales a nanoescala puede ser una estrategia prometedora para mejorar la producción de cultivos y su calidad. Sin embargo, tecnologías novedosas derivadas de la nanotecnología, como la utilización de nanomateriales en la agricultura implica una gran responsabilidad. El potencial de la nanotecnología en la mejora agrícola requiere de investigaciones antes de sus aplicaciones comerciales. Por lo que, investigaciones futuras deben tomar en cuenta el destino de los nanomateriales en el

medio ambiente y los efectos de sus aplicaciones a largo plazo en distintas condiciones climáticas y tipos de suelos. Así mismo, es importante analizar a profundidad los mecanismos de traslocación de nanomateriales en plantas y otras especies. Por lo anterior, se considera que la implementación cuidadosa de la nanotecnología tiene la posibilidad de revolucionar la agricultura del futuro.

Literatura citada

- An, C., Sun, C., Li, N., Huang, B., Jiang, J., Shen, Y., Wang, C., Zhao, X., Cui, B., Wang, C., Li, X., Zhan, S., Gao, F., Zeng, Z., Cui, H., & Wang, Y. (2022). Nanomaterials and nanotechnology for the delivery of agrochemicals: strategies towards sustainable agriculture. *Journal of Nanobiotechnology* 2021 20:1, 20(1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/s12951-021-01214-7>
- Ansari, M., Shahzadi, K., & Ahmed, S. (2020). Nanotechnology: A Breakthrough in Agronomy. *Nanoagronomy*, 1–21. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41275-3_1
- Atanda, S. A., Shaibu, R. O., & Agunbiade, F. O. (2025). Nanoparticles in agriculture: balancing food security and environmental sustainability. *Discover Agriculture* 2025 3:1, 3(1), 26-. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00159-x>
- Bashir, S. S., Hussain, A., Hussain, S. J., Wani, O. A., Zahid Nabi, S., Dar, N. A., Baloch, F. S., & Mansoor, S. (2021). Plant drought stress tolerance: understanding its physiological, biochemical and molecular mechanisms. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 35(1), 1912–1925. <https://doi.org/10.1080/13102818.2021.2020161>
- Biswas, A., Sarkar, S., Das, S., Dutta, S., Roy Choudhury, M., Giri, A., Bera, B., Bag, K., Mukherjee, B., Banerjee, K., Gupta, D., Paul, D., & Choudhury, R. M. (2025). Water scarcity: A global hindrance to sustainable development and agricultural production – A critical review of the impacts and adaptation strategies. *Cambridge Prisms: Water*, 3, e4. <https://doi.org/10.1017/wat.2024.16>
- Chhipa, H. (2019). Applications of nanotechnology in agriculture. *Methods in Microbiology*, 46, 115–142. <https://doi.org/10.1016/bs.mim.2019.01.002>



- Djanaguiraman, M., Anbazhagan, V., Dhankher, O. P., & Prasad, P. V. V. (2024). Uptake, Translocation, Toxicity, and Impact of Nanoparticles on Plant Physiological Processes. *Plants* 2024, Vol. 13, Page 3137, 13(22), 3137. <https://doi.org/10.3390/plants13223137>
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185–212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>
- Harish, V., Ansari, M. M., Tewari, D., Yadav, A. B., Sharma, N., Bawarig, S., García-Betancourt, M. L., Karatutlu, A., Bechelany, M., & Barhoum, A. (2023). Cutting-edge advances in tailoring size, shape, and functionality of nanoparticles and nanostructures: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 149, 105010. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105010>
- Hasanuzzaman, M., & Fujita, M. (2022). Plant Oxidative Stress: Biology, Physiology and Mitigation. *Plants (Basel, Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/plants11091185>
- Haydar, M. S., Ghosh, D., & Roy, S. (2024). Slow and controlled release nanofertilizers as an efficient tool for sustainable agriculture: Recent understanding and concerns. *Plant Nano Biology*, 7, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100058>
- Jayasekhar Babu, P., Saranya, S., Longchar, B., & Rajasekhar, A. (2022). Nanobiotechnology-mediated sustainable agriculture and post-harvest management. *Current Research in Biotechnology*, 4, 326–336. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2022.07.004>
- Junaid, M. D., Gokce, A. F., & Bostani, R. (2024). Pérdidas agrícolas mundiales y su causas. *Boletín de ciencias biológicas y afines s Investigación*, 2024(1), 66. <https://doi.org/10.54112/bbasr.v2024i1.66>
- Kah, M., & Kookana, R. (2020). Emerging investigator series: nanotechnology to develop novel agrochemicals: critical issues to consider in the global agricultural context. *Environmental Science: Nano*, 7(7), 1867–1873. <https://doi.org/10.1039/d0en00271b>
- Khalid, M. F., Iqbal Khan, R., Jawaid, M. Z., Shafqat, W., Hussain, S., Ahmed, T., Rizwan, M., Ercisli, S., Pop, O. L., & Alina Marc, R. (2022). Nanoparticles: The Plant Saviour under Abiotic Stresses. *Nanomaterials* 2022, Vol. 12, Page 3915, 12(21), 3915. <https://doi.org/10.3390/nano12213915>
- Khan, F., Pandey, P., & Upadhyay, T. K. (2022). Applications of Nanotechnology-Based Agrochemicals in Food Security and Sustainable Agriculture: An Overview. *Agriculture* 2022, Vol. 12, Page 1672, 12(10), 1672. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101672>
- Kumar, P., Panwar, H., Vashistha, H., Chaudhary, H., Kuamr, P., & Dubey, R. C. (2025). Relevance of Nanotechnology in Agriculture. *Nanofertilizers in Agriculture*, 3–29. https://doi.org/10.1007/978-3-031-78096-7_1
- Manjunatha S. B., Biradar, D. P., & Aladakatti, Y. R. (2016). Nanotechnology and its applications in agriculture: A review. *J. Farm Sci.*, 29((1)), 1–13. <https://www.researchgate.net/publication/303665019>
- Marchiol, L. (2018). Nanotechnology in Agriculture: New Opportunities and Perspectives. En *New Visions in Plant Science* (7). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74425>
- Mgadi, K., Ndaba, B., Roopnarain, A., Rama, H., & Adeleke, R. (2024). Nanoparticle applications in agriculture: overview and response of plant-associated microorganisms. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1354440. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1354440/pdf>
- Neme, K., Nafady, A., Uddin, S., & Tola, Y. B. (2021). Application of nanotechnology in agriculture, postharvest loss reduction and food processing: food security implication and challenges. *Heliyon*, 7(12), e08539. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08539/asset/890fb915-e9ed-40c0-8d20-499aba7afb25/main.assets/gr6_lrg.jpg
- Oliveira, H. C., Seabra, A. B., Kondak, S., Adedokun, O. P., & Kolbert, Z. (2023). Multilevel approach to plant–nanomaterial relationships: from cells to living ecosystems. *Journal of Experimental Botany*, 74(12), 3406–3424. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad107>



- Otles, S., & Sahyar, B. Y. (2018). Nanotechnology application and emergence in agriculture. *Emerging trends in agri-nanotechnology: fundamental and applied aspects*, 2(6), 204–213. <https://doi.org/10.1079/9781786391445.0204>
- Raza, A., Charagh, S., Salehi, H., Abbas, S., Saeed, F., Poinern, G. E. J., Siddique, K. H. M., & Varshney, R. K. (2023). Nano-enabled stress-smart agriculture: Can nanotechnology deliver drought and salinity-smart crops? *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 2(3), 189–214. <https://doi.org/10.1002/sae2.12061>
- 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.
- Sarraf, M., Vishwakarma, K., Kumar, V., Arif, N., Das, S., Johnson, R., Janeeshma, E., Puthur, J. T., Aliniaiefard, S., Chauhan, D. K., Fujita, M., & Hasanuzzaman, M. (2022). Metal/Metalloid-Based Nanomaterials for Plant Abiotic Stress Tolerance: An Overview of the Mechanisms. *Plants 2022*, Vol. 11, Page 316, 11(3), 316. <https://doi.org/10.3390/plants11030316>
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H. H., & Battaglia, M. L. (2021). Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants 2021*, Vol. 10, Page 259, 10(2), 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Tipu, M. M. H., Baroi, A., Rana, J., Islam, S., Jahan, R., Miah, Md. S., Asaduzzaman, Md., Tipu, M. M. H., Baroi, A., Rana, J., Islam, S., Jahan, R., Miah, Md. S., & Asaduzzaman, Md. (2021). Potential Applications of Nanotechnology in Agriculture: A Smart Tool for Sustainable Agriculture. En *Agricultural Development in Asia - Potential Use of Nano-Materials and Nano-Technology*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.101142>
- Upasana Sahoo, G. C. M. M. B. B. S. and S. M. (2022). *Application of Nanotechnology in Agriculture in India*. Indian Journal of Natural Sciences.
- Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., Rehman, H. ur, Ashraf, I., & Sanaullah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Science of The Total Environment*, 721, 137778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>
- Verma, K. K., Song, X. P., Kumari, A., Jagadesh, M., Singh, S. K., Bhatt, R., Singh, M., Seth, C. S., & Li, Y. R. (2024). Climate change adaptation: Challenges for agricultural sustainability. *Plant, Cell & Environment*. <https://doi.org/10.1111/pce.15078>
- Wei, L., Liu, J., & Jiang, G. (2024). Nanoparticle-specific transformations dictate nanoparticle effects associated with plants and implications for nanotechnology use in agriculture. *Nature Communications 2024* 15:1, 15(1), 7389-. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51741-8>
- Zaman, W., Ayaz, A., & Park, S. J. (2025). Nanomaterials in Agriculture: A Pathway to Enhanced Plant Growth and Abiotic Stress Resistance. *Plants 2025*, Vol. 14, Page 716, 14(5), 716. <https://doi.org/10.3390/plants14050716>

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.

