

Nanotecnología: Impulsando la vida desde la semilla

Nanotechnology: Boosting life from the seed

Victoria Jared Borroel García¹, Rebeca Ivonne López González^{2*}, Jessica Lizbeth Coria Arellano¹, Elizabeth Macías Cortés¹, José Dimas López Martínez¹, Jesús Alejandro Valdés Nieblas¹

¹Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Av. Tecnológico No. 1555 Sur. Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Estado de Durango C.P. 35150.

²Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia. Carretera Gómez Palacio – Tlahualilo Km. 32, Venecia, Gómez Palacio, Dgo., México.

*Autor para correspondencia: becky644@hotmail.com

RESUMEN

La agricultura moderna se enfrenta a desafíos crecientes: alimentar a una población mundial en constante aumento, mientras se minimiza el impacto ambiental y se optimiza el uso de recursos. En este escenario, la nanotecnología emerge como una herramienta revolucionaria, ofreciendo soluciones innovadoras desde el mismo inicio del ciclo de vida de un cultivo: la germinación de la semilla. La nanotecnología agrícola representa una frontera para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los cultivos. Las nanopartículas de hidroxiapatita (nHAp), compuestas de fosfato de calcio, son materiales biocompatibles y una fuente esencial de los macronutrientes fósforo y calcio. La hipótesis central es que, en la nanoescala, estas partículas mejoran la absorción de nutrientes y actúan como bioestimulantes. El estudio se diseñó para evaluar el impacto de las nHAp en la germinación de semillas de girasol a través de un enfoque dosis-dependiente. Se administraron cuatro tratamientos clave: T1: Control (0 ppm): Semillas tratadas únicamente con agua (o vehículo). T2: 2000 ppm: Concentración baja de nHAp. T3: 4000 ppm: Concentración intermedia de nHAp, T4: 6000 ppm Concentración alta de nHAp. Los resultados experimentales revelaron una respuesta no lineal a las concentraciones de nanopartículas, un fenómeno común conocido como efecto hormético en la nanobioteconología. El análisis demostró que el tratamiento de 4000 ppm fue, sin lugar a dudas, el que generó el mejor resultado en la germinación de semillas de girasol. Esta concentración óptima probablemente facilitó una absorción eficiente del calcio y el fósforo, acelerando los procesos metabólicos y de división celular requeridos para la emergencia de la radícula y el tallo.

Palabras clave: absorción, bioestimulantes, dosis, semillas

ABSTRACT

Modern agriculture faces growing challenges: feeding a constantly increasing global population while minimizing environmental impact and optimizing resource use. In this scenario, nanotechnology is emerging as a revolutionary tool, offering innovative solutions from the very beginning of a crop's life cycle: seed germination. Agricultural nanotechnology represents a frontier for improving crop efficiency and sustainability. Hydroxyapatite nanoparticles (nHAp), composed of calcium phosphate, are biocompatible materials and an essential source of the macronutrients phosphorus and calcium. The central hypothesis is that, at the nanoscale, these particles enhance nutrient uptake and act as biostimulants. This study was designed to evaluate the impact of nHAp on sunflower seed germination using a dose-dependent approach. Four key treatments were administered: T1: Control (0 ppm): Seeds treated only with water (or vehicle). T2: 2000 ppm: Low concentration of nHAp. T3: 4000 ppm: Intermediate concentration of nHAp, T4: 6000 ppm: High concentration of nHAp. The experimental results revealed a nonlinear response to nanoparticle concentrations, a common phenomenon known as the hormetic effect in nanobiotechnology. The analysis demonstrated that the 4000 ppm treatment undoubtedly yielded the best results in sunflower seed

germination. This optimal concentration likely facilitated efficient calcium and phosphorus absorption, accelerating the metabolic and cell division processes required for radicle and stem emergence.

Keywords: absorption, biostimulants, dose, seeds.

INTRODUCCIÓN

La germinación es un proceso biológico complejo y crucial. Una semilla, aparentemente inerte, debe absorber agua (un proceso conocido como imbibición), activar su metabolismo y desarrollar un embrión que finalmente dará lugar a una plántula. Sin embargo, este proceso puede verse afectado por múltiples factores: condiciones ambientales adversas (sequía, salinidad, temperaturas extremas), presencia de patógenos en el suelo, o la propia latencia de la semilla. Una germinación lenta, desuniforme o incompleta puede comprometer seriamente el rendimiento final del cultivo.

La nanotecnología, que trabaja con materiales a una escala extremadamente pequeña (nanómetros, es decir, una milmillonésima parte de un metro), permite manipular la materia de formas novedosas. A esta escala, las propiedades físicas y químicas de los materiales pueden diferir significativamente de las del material a granel (Saleh, 2020). Esta particularidad es lo que la hace tan prometedora para la agricultura, especialmente en la germinación.

La aplicación de la nanotecnología en semillas, a menudo a través de técnicas de "nano-priming" o recubrimientos nanométricos, busca mejorar el proceso de varias maneras:

Mejora de la imbibición y absorción de agua: Las nanopartículas pueden interactuar con la cubierta de la semilla, facilitando una absorción de agua más rápida y eficiente. Esto acelera la imbibición, que es la primera fase crítica para la activación metabólica de la semilla (Acharya *et al.*, 2020). Una imbibición optimizada conduce a una germinación más rápida y uniforme.

Entrega eficiente de nutrientes: Los nanofertilizantes son una de las aplicaciones más destacadas. Al encapsular nutrientes esenciales (como el fósforo, un recurso finito y crucial para el desarrollo temprano de la planta) en nanopartículas, se logra una liberación más controlada y precisa. Esto aumenta la disponibilidad del nutriente para la plántula, evitando

su fijación o lixiviación en el suelo, lo que se traduce en una mayor eficiencia de uso y una reducción de las pérdidas (Banotra *et al.*, 2017; Predoi *et al.*, 2020). Por ejemplo, la hidroxiapatita sintetizada en laboratorio en forma de nanopartículas puede dosificarse directamente para mejorar la disponibilidad de fósforo (Akhtar & Pervez, 2021).

Protección contra el estrés y patógenos: Las nanopartículas pueden actuar como vehículos para entregar compuestos bioactivos, hormonas o agentes protectores directamente a la semilla. Estos pueden fortalecer las defensas naturales de la plántula contra patógenos del suelo o aumentar su tolerancia a condiciones de estrés abiótico (como la sequía o la salinidad) desde las etapas más tempranas de su desarrollo.

Activación metabólica y crecimiento inicial: Al facilitar la entrada de agua y la entrega de nutrientes de manera más efectiva, la nanotecnología puede potenciar la activación de las enzimas y los procesos bioquímicos dentro de la semilla, lo que resulta en plántulas más vigorosas y con un mejor establecimiento inicial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento

El presente proyecto se llevó a cabo durante la temporada primavera-verano, en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, ubicado en la ciudad de Torreón, Coahuila, México. Las coordenadas geográficas son 25°33'19"N 103°22'14"W con dirección en el Periférico Raúl López Sánchez S/N colonia Valle Verde, CP 27054, Torreón, Coahuila.

Selección de las semillas

Las semillas fueron cuidadosamente seleccionadas, eligiendo aquellas que destacaban por su atractivo visual, tamaño (2 cm) y color (oscuro con línea vertical blanca). La variedad Giant Sunflower® se seleccionó por sus características específicas que se alinean con los objetivos de la investigación (Baldwin, Fawcett, & Wolkis, 2024; Borgo *et al.*, 2024; Seiler,

Gulya, & Marek, 2023). La calidad fisiológica de una semilla engloba el conjunto de propiedades y características que definen su capacidad potencial para desarrollarse (García-López *et al.*, 2016).

Establecimiento del experimento

Se dispusieron 100 semillas y se dividieron en grupos de 25, colocándolas en cajas Petri estériles con un diámetro de 100 mm con una altura de 15 mm (Figura 1). Se prepararon tres soluciones diferentes de nanopartículas de hidroxiapatita [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$], utilizando agua destilada como diluyente. La primera solución, denominada Tratamiento 1 (T1), contenía una concentración de 2000 ppm. La segunda solución, Tratamiento 2 (T2), tenía una concentración de 4000 ppm, y la tercera solución, Tratamiento 3 (T3), alcanzaba los 6000 ppm. Cada una de estas soluciones se administró a tres cajas Petri, aplicando 20 ml de la respectiva solución en para cada tratamiento, se estableció un tratamiento de control, mencionado como Tratamiento 4 (T4), que solo contenía agua destilada con tres repeticiones cada una. Las cajas Petri fueron cuidadosamente cubiertas y se mantuvieron a una temperatura constante de $25^\circ\text{C}\pm$.

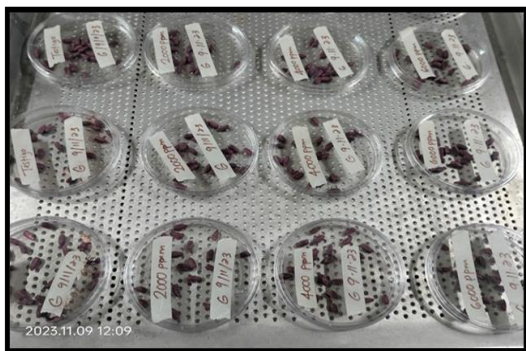


Figura 1. Cajas Petri previamente etiquetadas con las diferentes dosis de nHap

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los resultados obtenidos referentes a la germinación, se encontró que la hidroxiapatita promovió la germinación de las semillas tratadas en el T2 (2000 ppm) en un 88%, las que se trataron con el T3 (4000 ppm) en un 100%, las tratadas en el T4 (6000 ppm) en un 64% y para el tratamiento testigo se obtuvo un 72% de germinación (Tabla. 1). El tratamiento 4 (6000 ppm), no solo no se comportó igual que el tratamiento testigo, si no que, además, la

cantidad de semillas germinadas fue menor. Esta característica es importante para evaluar la velocidad de la germinación, la longevidad de las semillas, así como el crecimiento de las plántulas, este rasgo, determinará el éxito en el desarrollo de la planta (Reed *et al.*, 2022)(Flores-Hernández *et al.*, 2021). El hallazgo más relevante es que la aplicación de 4000 ppm (T3) de nHAp resultó en un 100% de germinación, superando significativamente al grupo control (72%). Este resultado es consistente con reportes recientes que demuestran la capacidad de los nanomateriales a base de fosfato de calcio para actuar como potentes bioestimulantes en la fase inicial del desarrollo vegetal (Mazaheri *et al.*, 2023). La hidroxiapatita nanoestructurada es una fuente biocompatible de fósforo (P) y calcio (Ca). El fósforo es fundamental para la transferencia de energía (ATP) y la síntesis de ácidos nucleicos durante la reactivación metabólica de la semilla, mientras que el calcio es un mediador esencial en la señalización celular y en la estabilización de las membranas durante la imbibición (Doolette *et al.*, 2021). La ventaja clave reside en el tamaño nanométrico de las partículas, que, debido a su alta relación superficie-volumen, facilita una absorción y translocación de nutrientes más eficiente a través de los microporos de la cubierta seminal, maximizando así la activación de las enzimas germinativas y la división celular (Raliya *et al.*, 2020). Los resultados obtenidos (T2: 88%, T3: 100%, T4: 64%) no siguen un patrón lineal de respuesta, lo cual es característico del fenómeno de hormesis observado frecuentemente con nanopartículas (Sabaghian *et al.*, 2022). Los resultados indican que la nHAp es un agente eficaz para el *seed priming* (pre-tratamiento de semillas). La diferencia de un 28% en la mejora de la germinación (72% a 100%) entre el control y el tratamiento de 4000 ppm es agrónomicamente significativa, pues asegura una mejor uniformidad en el establecimiento del cultivo.

El patrón dosis-respuesta obtenido (promoción en dosis intermedias e inhibición en dosis altas) resalta la necesidad de caracterizar cuidadosamente la dosis antes de cualquier aplicación a gran escala. Futuras investigaciones deberían centrarse en el mecanismo molecular exacto por el cual las nHAp a 4000 ppm modulan la expresión génica durante la germinación del girasol (Sabaghian *et al.*, 2022).

Tabla 1. Porcentaje de vigor de semillas incubadas con los tratamientos de nHAp.

Tratamiento	Semillas incubadas	Plántulas normales	Vigor de semilla (v%)
T1 0 ppm	25	18	72
T2 2000 ppm	25	22	88
T3 4000 ppm	25a	25a	100a
T4 6000 ppm	25	16	64

*Los valores con la misma letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes

CONCLUSIÓN

La nanotecnología en la germinación de cultivos representa un paso adelante hacia una agricultura más sostenible, eficiente y resiliente. Al optimizar los procesos biológicos fundamentales en las semillas, se abre la puerta a una producción de alimentos más segura y productiva, minimizando al mismo tiempo la huella ambiental de la actividad agrícola. La investigación en este campo continúa avanzando, prometiendo soluciones aún más innovadoras para los desafíos del mañana. Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que las nanopartículas de hidroxiapatita (nHAp) tienen un impacto significativo en la germinación de las semillas. El tratamiento con una concentración de 4000 ppm (T3) alcanzó una tasa de germinación del 100%, lo que sugiere que esta concentración favorece de manera notable la activación y el desarrollo inicial de las plantas de girasol. Los resultados obtenidos resaltan el potencial de las nanopartículas de hidroxiapatita como una herramienta prometedora en el mejoramiento de la germinación y el crecimiento de las plantas, sin embargo, es fundamental que futuras investigaciones se profundice en la evaluación de la sostenibilidad y los efectos a largo plazo de estas nanopartículas para comprender su viabilidad en aplicaciones agrícolas de mayor escala.

LITERATURA CITADA

Acharya, P., Jayaprakasha, G. K., Crosby, K., Jifon, J., & Patil, B. (2020). Nanoparticle-Mediated Seed Priming Improves Germination, Growth, Yield, and Quality of Watermelons (*Citrullus lanatus*) at multi-locations in Texas. *Scientific*

Reports, 10, 61696. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61696-7>

Akhtar, K., & Pervez, C. (2021). Evaluation of the experimental parameters for the morphological tuning of monodispersed calcium hydroxyapatite. *Journal of Dispersion Science & Technology*, 42(7), 984-997. <https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1724798>

Banotra, S., Gupta, N., & Singh, J. (2017). Nano-hydroxyapatite as a novel phosphorus nanofertilizer for sustainable agriculture. *International Journal of Chemical Studies*, 5(4), 1645-1649.

Doolette, C. L., Smernik, R. J., & Lard, E. H. (2021). Nano-scale fertilizers: A critical review of efficacy and environmental concerns. *Science of the Total Environment*, 764, 144578. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144578>

Flores-Hernández, E. A., Lira-Saldivar, R. H., Ruiz-Torres, N. A., García-López, J. I., Moreno-Reséndez, A., Rodríguez-Dimas, N., . . . Mendoza-Retana, S. S. (2021). Síntesis de nanopartículas de hidroxiapatita y su efecto en plántulas de *Raphanus sativus*. *Ecosistemas Y Recursos Agropecuarios*, 8(1), 12. <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2747>

Mazaheri, A., Torkamani, M., & Mousavi, S. R. (2023). Effect of different concentrations of hydroxyapatite nanoparticles on seed germination and seedling growth of wheat. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 26(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12892-022-00192-3>

Raliya, R., Tarafdar, J. C., & Dhakad, S. P. (2020). Synthesis and characterization of Ca-hydroxyapatite nanoparticles: Effects on seed germination and plant growth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(12), 3745-3753.

<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b07670>

Reed, R. C., Bradford, K. J., & Khanday, I. J. H. (2022). Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. *128(6)*, 450-459.



- Sabaghian, N., Jamei, R., & Khezri, S. (2022). The hormesis-like effect of calcium phosphate nanoparticles on seed germination and subsequent seedling growth of two medicinal plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 185, 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.06.015>
- Wang, P., Ma, X., & Liu, Y. (2022). Phytotoxicity and enhanced nutrient uptake of hydroxyapatite nanoparticles in agricultural crops: A review. *Environmental Pollution*, 305, 119293.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119293>