CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Revista digital universitaria
Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

Uso de la Nanotecnología en la Germinación del Cultivo de Girasol

Pérez-Esquivel, M.[1]; Borroel-García, V. J.[2]; Flores-Hernández, E. A[3]; Ramírez-Aragón, M. G.[4], Valdés-Nieblas J. A.[5]

Datos de Adscripción:

[1] Monserrat Pérez Esquivel. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Periférico Raúl López Sánchez S/N. Colonia Valle Verde, Torreón, Coahuila, México, CP. 27054. monserrat.perez6638@gmail.com. https://orcid.org/0000-0001-7032-3866

[2] ✉ Victoria Jared Borroel García. Tecnológico Nacional de México (TecNM), Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Av. Tecnológico N° 1555 Sur. Periférico Lerdo Km. 14.5, Plácido Domingo, Ciudad Lerdo, Durango, México, CP. 35150. victoria.bg@itslerdo.edu.mx. https://orcid.org/0000-0003-1752-5586

[3] Eduardo Aron Flores Hernández. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Periférico Raúl López Sánchez S/N. Colonia Valle Verde, Torreón, Coahuila, México, CP. 27054. sica1208@hotmail.com. https://orcid.org/0000-0001-7358-4578.

[4] Mercedes Georgina Ramírez Aragón. Tecnológico Nacional de México (TecNM), Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Av. Tecnológico N° 1555 Sur. Periférico Lerdo Km. 14.5, Plácido Domingo, Ciudad Lerdo, Durango, México, CP. 35150. georgina.ra@itslerdo.edu.mx. https://orcid.org/0000-0002-8044-3893

[5] Jesús Alejandro Valdés Nieblas. Tecnológico Nacional de México (TecNM), Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Av. Tecnológico N° 1555 Sur. Periférico Lerdo Km. 14.5, Plácido Domingo, Ciudad Lerdo, Durango, México, CP. 35150. alejandro.valdes@itslerdo.edu.mx. https://orcid.org/0009-0000-8184-3349

Resumen **- La agricultura es una actividad fundamental en todo el mundo, sin embargo, enfrenta desafíos significativos, tales como la pérdida de seguridad alimentaria mundial, disminución de los recursos fósiles y la reducción en la producción agrícola derivados de las prácticas agrícolas tradicionales. La nanotecnología (NT) en los agroquímicos ha crecido con el fin de mejorar la producción de cultivos y hacerla más sostenible. Las nanopartículas de hidroxiapatita (nHAp) sintética suministran suficientes nutrientes de Fósforo (P) y Calcio (Ca) a las plantas favoreciendo su germinación, crecimiento y desarrollo. El cultivo de Girasol (*Helianthus annuus*) es conocido por su valor nutritivo y económico debido a su contenido de aceites. El objetivo del presente estudio fue evaluar las diferentes dosis de nanopartículas de hidroxiapatita (nHAp) aplicadas en semillas de girasol. Se utilizaron 100 semillas de la variedad Giant Sunflower y se administraron tres diferentes diluciones de nHAp en la etapa de imbibición: T1 0 ppm, T2 2000 ppm. T3 4000 ppm y T4 6000 ppm, los resultados mostraron que el T3, resultó ser el que logró un 100 % de germinación y el más eficaz en promover el crecimiento vertical de las plantas, las variables agronómicas evaluadas fueron la etapa de germinación de las semillas y crecimiento del cultivo. Para el análisis estadístico se realizó un ANOVA y se realizó una comparación de medias mediante la prueba DMS ($p<0.05$) para evaluar las diferencias significativas entre tratamientos. De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que la nanotecnología influye en la germinación y crecimiento del cultivo de girasol.**

Palabras Clave **- Nanofertilizantes, Planta, Plúmula, Suelo, Tratamientos.**

Abstract **- Agriculture is a fundamental activity worldwide, however, it faces major challenges, such as declining global food security, reduced availability of fossil fuels, and decreasing agricultural yields resulting from traditional farming practices. Nanotechnology (NT) in agrochemicals has emerged as a promising tool to enhance crop production and promote sustainability. Synthetic hydroxyapatite nanoparticles (nHAp) provide essential nutrients such as Phosphorus (P) and Calcium (Ca) to plants, supporting seed germination, growth, and overall development. Sunflower (*Helianthus annuus*) is recognized for its nutritional and economic value due to its oil content. This study aimed to evaluate the effects of different concentrations of hydroxyapatite nanoparticles (nHAp) on sunflower seeds germinations and early growth. A total of 100 seeds of the Giant Sunflower variety were used, and four treatments were applied during the seed imbibition stage: T1 (0 ppm), T2 (2000 ppm), T3 (4000 ppm) and T4 (6000 ppm). The results showed that T3 (4000 ppm) achieved 100% germination and was the most effective in promoting vertical growth. The main agronomic variables evaluated were germination rate and crop growth. For statistical analysis, ANOVA was conducted, followed by a mean comparison using the LSD test ($p<0.05$) to determine significant differences among treatments. Based on the findings, it is concluded that nanotechnology has a positive influence on the germination and growth of sunflower crops.**

Keywords**: Nanofertilizers, Plant, Plumule, Soil, Treatments.**

I. INTRODUCCIÓN

Para satisfacer la creciente demanda global de alimentos, la Revolución Verde se puso en marcha en la década de 1960, promoviendo el uso intensivo de fertilizantes sintéticos para aumentar la productividad agrícola. Sin embargo, las reservas de roca fosfórica, un componente esencial en la producción de fertilizantes fosfatados, son limitadas. Se estima que estas reservas podrían agotarse en los próximos 50 a 125 años si se mantiene el ritmo de explotación actual. A medida que la extracción de roca fosfórica continúa, la calidad del material disminuye, los costos de producción se elevan, y la preocupación por el futuro suministro de fósforo (P) recibe poca atención (Flores-Hernandez et al., 2021).

La agricultura es una actividad fundamental en todo el mundo (Paz et al., 2023; Dayal et al., 2021). El sector agrícola enfrenta desafíos significativos, tales como la pérdida de seguridad alimentaria mundial, disminución de los recursos fósiles y la reducción en la producción agrícola derivados de las prácticas agrícolas tradicionales (Ilmudeen et al., 2022). En las últimas seis décadas, los fertilizantes químicos han sido cruciales para

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID010

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

aumentar la producción agrícola y garantizar el suministro de alimentos a nivel mundial (Ilmudeen et al., 2022). Estos afectan negativamente al equilibrio inherente de nutrientes del suelo provocando la contaminación ambiental que afecta a la flora y la fauna (Banotra et al., 2017) el uso excesivo de fertilizantes reduce la microflora del suelo y disminuye la fijación de nitrógeno.

Según Kim, en 2024 la Nanotecnología se ha definido generalmente como el control de la materia en una escala que se preocupa de 1 a 100 nm. Más allá de distinguir un intervalo de escala, la definición dada por decir la verdad no especifica un material particular sino más bien una identidad. A pesar de esto, la historia NT ha sido escrita exclusivamente en relación con lo inorgánico, comenzando con la ingeniería mecánica y de materiales, y documenta éxitos en la industria de semiconductores, inventos de microscopios de sonda de barrido SPM y el descubrimiento del nanotubo de carbono. Aunado a las propiedades innovadoras de la nanotecnología, investigaciones con nanopartículas metálicas de sílice, aluminio y óxido de titanio, empleadas en materiales de construcción y otros sectores, han mostrado que se difunden fácilmente, son resistentes, tienen una estructura dimensional única y pueden ingresar en sistemas biológicos (Paz et al., 2023). La nanotecnología (NT), emerge con su capacidad para generar cambios significativos en diversas áreas científicas y la integración tecnológica (Dey y Nandy, 2024; Lira et al., 2018). El uso de la NT en los agroquímicos ha crecido con el objetivo de mejorar la producción de cultivos y hacerla más sostenible (Paz et al., 2023, Balusamy et al., 2023, Chávez-García et al., 2020). Los nanofertilizantes están diseñados para liberar nutrientes de manera más controlada y eficiente, lo que mejora la absorción por parte de las plantas y reduce el desperdicio ya que estos nanofertilizantes pueden penetrar el suelo y las raíces de manera más efectiva, proporcionando los nutrientes directamente donde más se necesitan (Żukowska et al., 2024, Sales et al., 2024). El impacto de los nanomateriales en el medio ambiente, tanto sus riesgos como sus beneficios, es un tema de gran controversia en la actualidad, la comunidad científica está dedicando un esfuerzo considerable para estudiar y evaluar las posibles consecuencias, positivas y negativas, que estos materiales pueden tener en los ecosistemas y en la salud humana (Dey & Nandy, 2024).

El sector agrícola enfrenta desafíos significativos, tales como la pérdida de seguridad alimentaria mundial, el cambio climático, la disminución de los recursos fósiles, la contaminación de las aguas subterráneas, la erosión del suelo, la reducción en la producción agrícola y los cultivos infructuosos, todos ellos derivados de las prácticas agrícolas tradicionales. Si bien los agroquímicos han mejorado la producción de cultivos y controlado plagas y enfermedades, también han generado riesgos negativos a largo plazo. En las últimas seis décadas, los fertilizantes químicos han sido cruciales para aumentar la producción agrícola y garantizar el suministro de alimentos a nivel mundial. Sin embargo, su uso ha provocado diversos problemas, como la contaminación de las aguas subterráneas, la acidificación y salinización del suelo, la degradación de la fertilidad del suelo, la pérdida de biodiversidad y el alto consumo de energía en los procesos de síntesis (Ilmudeen et al., 2022). La agricultura es una de las muchas áreas científicas que están especialmente favorables en la creciente ciencia de la nanotecnología(Nawaz et al., 2024).

El empleo de agroquímicos sintéticos convencionales agrava la presencia de metales pesados y agentes tóxicos, lo que deteriora la calidad y reduce la fertilidad natural del suelo. Como una solución prometedora para enfrentar la inminente escasez de P, se ha planteado el uso de hidroxiapatita sintetizada en laboratorio (roca fosfórica). Este compuesto puede aplicarse directamente a los cultivos en forma de suspensión de nanopartículas, lo que mejora su absorción y eficacia al evitar su fijación en el suelo, aumentando así la disponibilidad de P para las plantas. Es crucial destacar que las propiedades físicas y químicas de los materiales a escala nanométrica difieren significativamente de las del material a granel. Por lo tanto, la implementación de nanofertilizantes que permiten una liberación y un control preciso de los nutrientes favorece el desarrollo de una agricultura sostenible y amigable con el ambiente, al reducir la cantidad de insumos necesarios y minimizar las pérdidas de nutrientes (Flores-Hernández et al., 2021).

Generalmente conocida como hidroxiapatita (HA), esta sustancia tiene la fórmula química $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ (Akhtar & Pervez, 2021). El compuesto de fosfato de calcio, bien conocido en la comunidad científica, ha despertado un gran interés en diversos campos debido a sus propiedades únicas, estas características excepcionales han llevado a su uso en áreas como la medicina, especialmente en la regeneración ósea y dental, así como en la fabricación de biocerámicas y biomateriales avanzados su capacidad para imitar la composición y estructura de los huesos humanos lo convierte en un material muy valorado para aplicaciones. (Benataya et al., 2024).

Es fundamental y relevante comprender la química, producción, reactividad y los posibles procesos de las nanopartículas (NP) y su interacción con componentes naturales, esta necesidad ha llevado a los científicos a investigar el impacto de ciertas nanopartículas diseñadas (ENP) en diversos sistemas vegetales para entender la movilidad, reactividad, toxicidad y persistencia de distintos ENP para evaluar adecuadamente los riesgos que se presenten en el medio ambiente(Dey & Nandy, 2024)

La Hidroxiapatita es un tipo de nanofertilizantes de fósforo, que supera a la forma natural del fosfato de roca, debido a su alta solubilidad en agua, también mitigan el problema de la baja disponibilidad de nutrientes que presentan los fertilizantes de fósforo convencionales, además, se considera que los nanomateriales contribuyen a la liberación lenta de fertilizantes (Lira et al., 2018). Según Bantora et al (2017) las nHAp sintética suministran suficiente P a las plantas. Esta sustancia tiene la fórmula química $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ (Akhtar y Pervez, 2021), y se puede considerar como un tipo de nanofertilizantes de fósforo, que supera a la forma natural del fosfato de roca, debido a su alta solubilidad en agua, también mitigan el problema de la baja disponibilidad de nutrientes que presentan los fertilizantes de fósforo convencionales, además, se considera que los nanomateriales contribuyen a la liberación lenta de fertilizantes (Ilmudeen et al., 2022). Las nanopartículas de hidroxiapatita han sido aplicadas en diversos aspectos, uno de ellos es el uso en la nutrición animal, logrando obtener una fuente de suplementación eficiente en las dietas ofrecidas a los mismos, un ejemplo de ello es en la dieta de las aves de corral, que además de proporcionar los minerales necesarios para su crecimiento y desarrollo, ha demostrado ser eficiente y productiva en la calidad de la carne, características óseas y su estado de salud en general (Matuszewski et al., 2021).

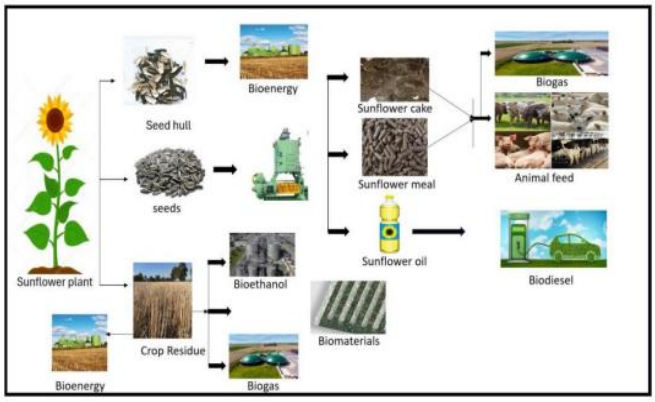
h t t p s : / / d o i . o r g / 1 0 . 6 2 8 0 5 / c i d 2 0 2 5 . C I D 0 1 0
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

En el ámbito de la agricultura, las nanopartículas están encontrando diversas aplicaciones innovadoras. Una de las principales es su uso como nanofertilizantes, donde estas pequeñas partículas pueden liberar nutrientes de manera más eficiente y controlada, mejorando la salud de las plantas y reduciendo la necesidad de fertilizantes convencionales. Además, las nanopartículas también se emplean como nanopesticidas y nanofertilizantes (Balusamy, Joshi, Perumalsamy, Mijakovic, & Singh, 2023). Los nanofertilizantes son versiones mejoradas o sintéticas de los fertilizantes tradicionales. Estos incluyen fertilizantes complejos y extractos de distintas partes vegetativas o reproductivas de las plantas, que se desarrollan mediante diversos métodos biológicos, químicos, físicos y mecánicos el objetivo principal de los nanofertilizantes es mejorar la calidad y eficiencia de la producción agrícola (Ilmudeen et al., 2022).

Gracias a su diminuto tamaño, que varía entre 1 y 100 nm, los nanofertilizantes cuentan con una amplia superficie que permite un uso más eficiente de los nutrientes. Esta extensa superficie proporciona múltiples sitios para diversas reacciones metabólicas en las plantas. Además, el tamaño reducido de las nanopartículas, inferior al de los poros de las hojas y raíces, facilita una mayor penetración de nutrientes desde el exterior hacia las raíces y hojas de la planta (Ilmudeen et al., 2022).
La planta de girasol (*Helianthus annuus* L.) tiene estructuras esenciales: raíces, tallos, hojas, flores y semillas, la raíz principal, robusta y profunda, puede alcanzar entre 150 y 270 cm de profundidad, extendiéndose lateralmente hasta 150 cm, el tallo es rígido y grueso, llegando a medir entre 1 y 3 metros de altura, con algunas variedades presentando ramificaciones, el tamaño y la estructura del tallo varían según la variedad y el entorno, las hojas, que son opuestas en la parte inferior del tallo y alternas en la superior, varían en forma y color, de verde claro a verde oscuro y las flores, en forma de plato, se encuentran en la parte superior del tallo principal o de las ramas, con diámetros que varían de 6 a 37 cm (Puttha et al., 2023). El Girasol es un cultivo conocido por su valor nutritivo y económico debido a su contenido de aceites (Ceylan et al., 2023). Es un cultivo oleaginoso de gran relevancia en el panorama agrícola mundial, tanto por la cantidad de producción que genera como por la calidad de sus productos (Mahapatra *et al.*, 2020). El cual contribuye al 10 % del aceite comestible total producido en el mundo (Rauf et al., 2020). El aceite de girasol es una fuente valiosa de ácido linoleico, beneficioso para la salud. Este aceite está compuesto en su mayoría por ácidos grasos (alrededor del 90%), junto con fitoesteroles (9%) y una pequeña pero importante cantidad de vitamina E (1%). Estos componentes no solo ayudan a reducir el colesterol malo, sino que también fortalecen el sistema inmunológico y protegen contra enfermedades del corazón (Rauf et al., 2020). El girasol es considerado uno de los tres principales cultivos de forma extensiva, junto con el maíz y la soya (Popov et al., 2021). La producción de girasol alcanza casi 23 millones de hectáreas anuales en alrededor de 60 países. Este cultivo se sitúa como el segundo híbrido más relevante y ocupa el quinto lugar entre las semillas oleaginosas más importantes (Roy et al., 2024). El girasol ocupa el cuarto lugar entre los cultivos oleaginosos más importantes a nivel mundial de esta producción global de girasol, hasta un 70% se lleva a cabo en Europa (Matysiak, 2024).

El cultivo de girasol es de suma importancia económica que se puede procesar para obtener una variedad de productos (Fig. 1) (Puttha et al., 2023).

Figura 1
Productos y subproductos obtenidos del cultivo de girasol.



La germinación de las semillas es crucial para el crecimiento de una nueva planta, ya sea en la agricultura o en su entorno natural, este proceso inicial es fundamental para asegurar que las plantas puedan establecerse, crecer y desarrollarse correctamente, en la agricultura, una buena germinación es esencial para obtener cosechas abundantes y saludables (El-Maarouf-Bouteau, 2022). La primera etapa del desarrollo y crecimiento de las semillas en su ciclo de vida es la germinación, para que las plantas crezcan y se desarrollen adecuadamente, es esencial que las semillas tengan una alta capacidad de germinación (Li et al., 2020). La germinación rápida y sincrónica de las semillas y el crecimiento de las plántulas son particularmente importantes para la producción agrícola porque son esenciales para el establecimiento de las plántulas en el campo (Reed et al., 2022). La calidad fisiológica de las semillas se refiere a un conjunto de propiedades y características que determinan el rendimiento y el éxito del cultivo. Estas propiedades afectan varios aspectos del crecimiento de las plantas, desde la germinación hasta el desarrollo inicial de las plántulas. Cuando las semillas tienen una alta calidad fisiológica, tienen un mayor potencial para germinar de manera uniforme y vigorosa, lo que resulta en cultivos más saludables y productivos (García-López, Ruiz-Torres, Lira-Saldivar, Vera-Reyes, & Méndez-Argüello, 2016). La absorción de agua por parte de las semillas ocurre en tres etapas: primero, la imbibición, donde la semilla toma agua y se hincha; luego, la activación, donde se inicia la germinación; y finalmente, el crecimiento del embrión y la radícula o epicótilo, que es cuando la semilla comienza a desarrollarse en una planta. Durante la preparación de las semillas para su almacenamiento, se interrumpe la imbibición al inicio de la fase de crecimiento, y las semillas se secan nuevamente para conservarlas adecuadamente (Pedrini et al., 2020).

El girasol es una fuente fundamental de propiedades medicinales que se aprovechan en todo el mundo, tanto como alimento nutritivo (Bashir et al., 2021). Las semillas de girasol son una de las fuentes nutricionales con grasas insaturadas saludables, así como de proteínas y fibra que son beneficiosas para la salud. También son una excelente fuente de minerales como el selenio, el cobre y el zinc, y proporcionan ácido fólico y hierro, nutrientes

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID010
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

esenciales para el organismo además, contienen fitoquímicos que pueden ayudar a prevenir enfermedades (Puraikalan y Scott, 2023). Las semillas son el sistema de entrega para transferir la genética avanzada al campo de producción (Reed et al., 2022).

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Ubicación del experimento

El experimento se llevó a cabo durante la temporada primavera-verano del 2024, en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, ubicado en la ciudad de Torreón, Coahuila, México.

2.2 Selección de las semillas

Las semillas fueron cuidadosamente seleccionadas, eligiendo aquellas que destacaban por tener las mejores características como tamaño (2 cm) y color (oscuro con línea vertical blanca). Se utilizó la variedad Giant Sunflower ®

2.3 Establecimiento del experimento (etapa de imbibición)

El proceso de imbibición implica la absorción de agua por parte de las semillas, lo cual estimula directamente al embrión y activa la etapa de pre-germinación, a medida que las semillas absorben agua, sus tejidos se hidratan, lo que desencadena una serie de reacciones bioquímicas vitales para el inicio de la germinación (Mejía & Reyes, 2020).

Se dispusieron 100 semillas las cuales se dividieron en grupos de 25, colocándolas en cajas Petri estériles con un diámetro de 100 mm con una altura de 15 mm. Los tratamientos consistieron en cuatro con tres repeticiones, denominadas de la siguiente manera: control (T1) que contenía agua destilada y tres soluciones de nanopartículas de hidroxiapatita [$(Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$], Tratamiento 2 (T2) a una concentración de 2000 ppm, Tratamiento 3 (T3), a una concentración de 4000 ppm y Tratamiento 4 (T4) con 6000 ppm. Cada una de estas soluciones se aplicaron en dosis de 20 ml, Las cajas Petri fueron cuidadosamente cubiertas y se mantuvieron a una temperatura constante de 25 °C±. Este proceso se llevó a cabo durante un período de 30 horas dentro de una cámara de crecimiento LAB-LINE INSTRUMENTS, INC, garantizando así un entorno controlado. Durante todo este tiempo, las cajas Petri permanecieron en completa oscuridad, creando así las condiciones óptimas para el desarrollo adecuado de las semillas

2.4 Germinación en papel

Enseguida qué finalizó la etapa de imbibición, las semillas se colocaron en papel Anchor previamente humedecido con agua destilada para garantizar la distribución uniforme de la humedad, las semillas se dispusieron con el embrión hacia abajo, asegurando un espacio adecuado para evitar la competencia por recursos, posteriormente se procedió al enrollamiento del papel y los rollos se colocaron verticalmente dentro de una cesta de plástico.

Posteriormente, se colocaron en una cámara de crecimiento controlada, los rollos de germinación se mantuvieron durante un periodo de 7 días, bajo un régimen de luz y oscuridad que consistía en 16 horas de luz seguidas por 8 horas de oscuridad. La temperatura dentro de la cámara se mantuvo constante en 25 °C, asegurando así condiciones óptimas para el crecimiento.

2.5 Síntesis de nanopartículas de hidroxiapatita

La síntesis de las HAp NPs se realizó mediante el procedimiento descrito por Flores-Hernández et al 2021, a partir de una solución acuosa de hidróxido de calcio [$Ca(OH)_2$] y ácido orto fosfórico (H_3PO_4), con una relación estequiométrica de Ca/P = 1.67. La mezcla se mantuvo en constante agitación y se calentó a 95 °C para activar la reacción química.

Una vez realizada la reacción de síntesis de nHAp, la solución resultante se dejó reposar durante 72 h hasta que el producto esperado se precipitó y formó la separación de fase, al final del tiempo indicado.

2.6 Trasplante

Se realizó a los 14 días después de la etapa de germinación en suelo directo bajo condiciones de invernadero, para mejor control de las condiciones.

2.7 Variables a medir

Peso de las semillas antes y durante el proceso de imbibición, las semillas se pesaron en balanza analítica registrándose el peso en gramos.

El rango de vigor de la semilla se evaluó al cuarto día, utilizando la siguiente fórmula:

$$Vigor\ de\ semilla\ (V\%) = \frac{plántulas\ normales}{número\ de\ semillas\ incubadas}\ x\ 100 \quad (1)$$

Se tomaron en cuenta las plántulas con desarrollo de la plúmula y la raíz en un tamaño de 2 cm.

Variables agronómicas, longitud de planta, diámetro de tallo y diámetro de capítulo.

Tabla 1
Peso de las semillas durante el proceso de imbibición a las 30 h.

Tratamiento	*Peso (g) al inicio del experimento*	*Peso (g) después de la etapa de imbibición*	*(g) que aumentó durante el proceso de imbibición*
T1 0 ppm	2.2	6	3.8
T2 2000 ppm	2.6	6.2	3.6
T3 4000 ppm	2.5a	6.5a	4a
T4 6000 ppm	2.2	5.8	3.6

Tabla 2
Total de semillas germinadas.

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

h t t p s : / / d o i . o r g / 1 0 . 6 2 8 0 5 / c i d 2 0 2 5 . C I D 0 1 0
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

Tabla 3
Variables agronómicas.

Tratamiento	*Longitud (m)*	*Diámetro de tallo (cm)*	*Diámetro de capitulo (cm)*
T1 0 ppm	NR	NR	NR
T2 2000 ppm	1.16	2.7	16.3
T3 4000 ppm	2.48a	3.1a	20.5a
T4 6000 ppm	1.89	2.3	18.1

NR: no reportado

Figura 2
Planta en invernadero a los 100 días.

III.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La etapa clave en la germinación de las semillas es la imbibición, momento en el que la semilla pasa del letargo al crecimiento, lo que a su vez desencadena una serie de procesos bioquímicos y fisiológicos que finalmente dan lugar a la plántula. Pérez et al 2016 hacen referencia a que las semillas en agua, se observan tres fases de actividad respiratoria plenamente reconocidas, absorción, síntesis de proteínas y desarrollo de embrión. En comparación a los resultados obtenidos en el presente estudio se observa un mayor resultado teniendo un mayor peso de semilla y mayor porcentaje de vigor en el tratamiento de 4000 ppm (6.5 g) (Tabla 1). Es importante destacar que, si las fases de imbibición se prolongan demasiado, esto afecta a su vez la germinación, la emergencia y el desarrollo de los embriones. En el trabajo de investigación los resultados nos muestran que las nHAp, como inhibidora de las semillas de girasol en diferentes tratamientos influenciaron en la respuesta de germinación y posterior desarrollo de las plántulas, es de suma importancia mencionar que las nHAp solo se aplicaron una vez en la etapa de imbibición (Tabla 2). Estos resultados coinciden con los obtenidos por (López-Martínez et al., 2023) quienes reportaron que las nanopartículas de hidroxiapatita mejoran la imbibición en semillas de rábano lo que no afecta el vigor y la germinación, pero dosis de 500 y 1 000 mg L−1 generan un efecto inhibitorio de esta y otras variables. (Maghsoodi et al,.2020) concuerda que el uso de nHAp puede proporcionar la liberación lenta de elementos químicos a la plata durante varias etapas del crecimiento y así aumentar el rendimiento Los resultados obtenidos en este estudio sobre el uso de nHAp en la germinación y crecimiento de cultivos coinciden en varios aspectos con los hallazgos de (Pradhan et al., 2021), quienes evaluaron el impacto de nHAp cargadas con urea (Ur@HANP) en el transporte de nutrientes y la germinación de semillas de arroz. Ambos estudios reportan una mejora significativa en la germinación y el crecimiento de las plantas, lo que indica que las nHAp, con o sin carga de nutrientes, pueden desempeñar un papel crucial en la mejora de la agricultura. Además, mientras que los resultados de (Pradhan et al., 2021) sugieren que el Ur@HANP es una alternativa adecuada para la agricultura sostenible, los hallazgos encontrados en el presente estudio indican que las nanopartículas de hidroxiapatita sin carga de fertilizantes también pueden mejorar la eficiencia de los fertilizantes aplicados convencionalmente, reduciendo el impacto ambiental. (Khan et al., 2023) suponen que los efectos similares de las nanopartículas están asociados con una absorción más rápida de agua por parte de las semillas, mayores actividades de α-amilasa, mayores contenidos de azúcar soluble y regulación del nivel de expresión relativa de los genes responsables de la relación ABA/GA, las enzimas antioxidantes y la homeostasis iónica. La similitud en los resultados obtenidos del experimento de girasol se asemeja a los resultados obtenidos de (Acharya et al., 2020) el cual se observó mayor rendimiento en sandías tratadas con AgNP, podría reflejar un mecanismo generalizado en el que las nanopartículas actúan como un factor que favorece la absorción de agua o la activación de enzimas clave en el proceso de germinación, tal como se ha documentado con nanopartículas de plata (AgNP). Mendez et al 2016 argumentan que los materiales nanométricos con mayor superficie podrían, de hecho, mejorar la absorción, translocación y almacenamiento de nutrientes en las plantas. También se ha reportado que el crecimiento y el rendimiento de los cultivos podrían aumentar debido a la inhibición o el control de enfermedades por parte de las nanopartículas de ZnO. Asimismo, observaron que estas nanopartículas incrementan la actividad de ciertas enzimas como la fitasa, la fosfatasa ácida y la alcalina, lo que a su vez podría ser un factor en la solubilización de nutrientes como el fósforo orgánico y su absorción por las plantas. El cultivo de girasol (*Helianthus annuus* L.) es de gran importancia agronómica, especialmente por su producción de aceite y subproductos para alimentación animal (Figura 1). Su rendimiento y calidad están influenciados por una interacción compleja de variables agronómicas y ambientales, tales como la longitud de planta, diámetro de tallo y diámetro de capítulo (Tabla 3), los resultados obtenidos en el presente estudio con respecto a las variables agronómicas superan a los reportados por Vital-Vilchis et al quienes en el 2020 realizaron una investigación sobre la influencia de hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento del cultivo de girasol, denotando que el crecimiento depende de cierta manera por la variedad y el manejo agronómico. Ríos et al 2025 sugieren que el uso de nanopartículas promueve de manera significativa el crecimiento y desarrollo de plántulas de maíz con efecto positivo en las variables longitud de planta y diámetro de tallo, esto se puede atribuir a la mejora en la absorción de nutrientes y a la estimulación en la actividad fotosintética, así como en el efecto antimicrobiano de las nanopartículas, lo que provee un sistema radicular sano

IV. CONCLUSIONES

Los hallazgos de este estudio revelan un potencial significativo en la aplicación de la nanotecnología para mejorar aspectos cruciales del desarrollo de cultivos, específicamente en el girasol. Los resultados obtenidos evidencian que las nanopartículas de hidroxiapatita (nHAp) ejercen un impacto notable en la germinación de las semillas, un proceso fundamental que determina el establecimiento y el vigor inicial de la planta.

h t t p s : / / d o i . o r g / 1 0 . 6 2 8 0 5 / c i d 2 0 2 5 . C I D 0 1 0
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Particularmente, el tratamiento con una concentración de 4000 ppm de nHAp (T3) se destacó al alcanzar una tasa de germinación del 100%. Este resultado es de suma importancia, ya que una germinación completa y uniforme es el primer paso indispensable para asegurar un stand de plantas óptimo en el campo. Tradicionalmente, la germinación puede ser un cuello de botella en la producción agrícola, afectada por factores como la calidad de la semilla, las condiciones de humedad, temperatura, salinidad del suelo o la presencia de patógenos. La capacidad de las nHAp para inducir una germinación tan eficiente sugiere un papel activo en la superación de posibles barreras, facilitando la imbibición de agua y la activación metabólica temprana de la semilla. Este proceso de pre-tratamiento con nanopartículas puede acelerar la rehidratación de los tejidos de la semilla y la activación de enzimas clave, lo que se traduce en una emergencia más rápida y vigorosa de la radícula y la plúmula.

La relevancia de estos resultados va más allá de la simple germinación. Un inicio de ciclo de vida robusto, caracterizado por una germinación del 100%, sienta las bases para un crecimiento y desarrollo vegetal superior. Esto se refleja directamente en variables agronómicas de gran importancia como la longitud de la planta (altura), el diámetro del tallo y el diámetro del capítulo. Estas tres variables no actúan de forma aislada, sino que están interconectadas en el desarrollo fisiológico del girasol y son determinantes del rendimiento final del cultivo.

Una plántula que emerge con mayor vigor y uniformidad, gracias a la influencia de las nHAp, tiene una ventaja competitiva desde el inicio. Se espera que esta fortaleza inicial se traduzca en un mayor crecimiento en altura, permitiendo una intercepción más eficiente de la luz solar y una mayor capacidad fotosintética. Paralelamente, el desarrollo de un tallo más robusto y de mayor diámetro es un prerrequisito fundamental para soportar el peso de un capítulo de buen tamaño y bien lleno durante las etapas reproductivas. Un tallo fuerte previene el acame, asegurando que la planta pueda sostener su carga de semillas hasta la madurez fisiológica. El diámetro del capítulo, a su vez, está directamente correlacionado con el número de semillas por capítulo y el peso individual de las mismas, siendo un componente crucial del rendimiento de grano y aceite.

El potencial de las nHAp como una herramienta prometedora en el mejoramiento de la germinación y el crecimiento de las plantas radica en sus propiedades a escala nanométrica. A diferencia de los materiales a granel, las nanopartículas poseen una mayor área superficial y una reactividad mejorada, lo que puede facilitar la absorción y la translocación de nutrientes, como el fósforo (P), un elemento esencial y a menudo limitante en los suelos agrícolas. La hidroxiapatita, una fuente de fósforo, en su forma nanométrica, podría evitar la fijación del P en el suelo, haciéndolo más disponible para las plantas y mejorando la eficiencia de su aplicación y absorción.

Sin embargo, a pesar de estos resultados alentadores, es fundamental que futuras investigaciones profundicen en la evaluación de la sostenibilidad y los efectos a largo plazo de estas nanopartículas. Es crucial comprender su destino en el suelo, su posible acumulación en los tejidos vegetales y su impacto en la cadena alimentaria, así como en la microbiota del suelo. La viabilidad en aplicaciones agrícolas de mayor escala dependerá no solo de la eficacia agronómica, sino también de una evaluación exhaustiva de su seguridad ambiental y económica. Se requieren estudios controlados que exploren rangos de concentración, métodos de aplicación y la interacción con diferentes tipos de suelo y condiciones climáticas para establecer protocolos de uso seguros y eficientes. La nanotecnología ofrece una vía innovadora para enfrentar los desafíos de la seguridad alimentaria, pero su implementación a gran escala debe ser cuidadosamente investigada y regulada para asegurar que sus beneficios superan cualquier riesgo potencial.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la Secretaría de Ciencia Humanidades, Tecnología e Innovación, por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación.

VI. REFERENCIAS

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 tunning of monodispersed calcium hydroxyapatite. *Journal of Dispersion Science & Technology*, *42*(7), 984-997. https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1724798

Balusamy, S. R., Joshi, A. S., Perumalsamy, H., Mijakovic, I., & Singh, P. (2023). Advancing sustainable agriculture: a critical review of smart and eco-friendly nanomaterial applications. *Journal of Nanobiotechnology*, *21*(1), 372. https://doi.org/10.1186/s12951-023-02135-3

Banotra, M., Kumar, A., Sharma, B. C., Nandan, B., Verma, A., Kumar, R., Gupta, V. & Bhagat, S. (2017). Prospectus of use of nanotechnology in agriculture-a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *6*(12), 1541. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.612.172

Bashir, T., Zia-Ur-Rehman Mashwani, K. Z., Haider, S., & Shaista Tabassum, M. (2021). 02. Chemistry, pharmacology and ethnomedicinal uses of Helianthus annuus (Sunflower): A Review. *Pure and Applied Biology (PAB)*, *4*(2), 226-235. http://dx.doi.org/10.19045/bspab.2015.42011

Ceylan, Y., Altunoglu, Y. C., & Horuz, E. (2023). HSF and Hsp Gene Families in sunflower: a comprehensive genome-wide determination survey and expression patterns under abiotic stress conditions. *Protoplasma*, *260*(6), 1473-1491. https://doi.org/10.1007/s00709-023-01862-6

Chávez-García, J. A., Andrade-Rodríguez, M., Bello-Bello, J. J., Rueda-Barrientos, M. C., Guillén-Sánchez, D. & Sainz-Aispuro, M. D. J. (2020). Nanopartículas de plata en el establecimiento in vitro de ápices de gladiolo. *Revista fitotecnia mexicana*, *43*(4A), 557-564. https://doi.org/10.35196/rfm.2020.4-a.557

Dayal, D., Patel, N. S., & Khoja, J. R. (2021). Nanofertilizers for Enhancing Nutrient use Efficiency and Crop Productivity in Vegetable Crops of Gujarat. *Bhartiya Krishi Anusandhan Patrika*, *36*(3), 260-263. Doi: 10.18805/BKAP343.

Dey, A., & Nandy, P. (2024). Size, shape, and dose—three crucial determinants for applying nanoparticles in sustainable plant

h t t p s : / / d o i . o r g / 1 0 . 6 2 8 0 5 / c i d 2 0 2 5 . C I D 0 1 0

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

biology. *Academia Biology*, *2*(3). https://doi.org/10.20935/AcadBiol7331

Flores-Hernández, E.A., Lira-Saldívar, R.H., Ruiz-Torres, N.A., García-López, J. I., Moreno-Reséndez, A., Rodríguez-Dimas, N., Preciado-Rangel, P. & Mendoza-Retana, S.S.(2021). Síntesis de nanopartículas de hidroxiapatita y su efecto en plántulas de Raphanus sativus. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, *8*(1), e2747. Epub 10 de octubre de 2022. https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2747

Ilmudeen, S., Farween, F., Mahaletchumi, S., & Kanchana, D. K. D. I. (2022). Advances of Nanofertilizers in modern agriculture. A review. *The Journal of Research Technology and Engineering*, *3*(2), 19-29.

Khan, S. R., Raza, A., & Ali, A. (2023). Role of metal nanoparticles in seed germination: Enhanced water uptake and α-amylase activity. *Journal of Plant Research*, 14(2), 115-128. https://doi.org/10.1000/jpr.2023.14.2.115

Lira Saldivar, R. H., Méndez Argüello, B., Santos Villarreal, G. D. L., & Vera Reyes, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta universitaria*, *28*(2), 9-24. https://doi.org/10.15174/au.2018.1575

López-Martínez G, Ruiz-Torres N, Diaz-Barriga-Castro E, Lira-Saldivar RH, López Hernández I, Luna-Anguiano J. & Flores-Hernandez EA (2023) Efecto de nanoparticulas de hidroxiapatita en el desarrollo y germinación de *Cucumis Sativus L. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* Núm. Esp. III: e3608.DOI: 10.19136/era.a10nIII.3608

Maghsoodi, M. R., Ghodszad, L. & Lajayer, B. A. (2020). Dilemma of hydroxyapatite nanoparticles as phosphorus fertilizer: Potentials, challenges and effects on plants. *Environmental Technology & Innovation*, *19*, 100869. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100869

Mahapatra, A., Gouda, B., Patel, D. & Behera, M. P. (2020). Integrated Nutrient Management in Sunflower (Helianthus annuus L.)–A Review. *Chemical Science Review and Letters*, *9*(36), 862-868. DOI:10.37273/chesci.CS205107176

Méndez-Argüello, B., Vera-Reyes, I., Mendoza-Mendoza, E., García-Cerda, L. A., Puente-Urbina, B. A., & Lira-Saldívar, R. H. (2016). Promoción del crecimiento en plantas de Capsicum annuum por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova scientia*, *8*(17), 140-156.

Paz-Trejo, C., Flores-Márquez, A. R., & Gómez-Arroyo, S. (2023). Nanotechnology in agriculture: a review of genotoxic studies of nanopesticides in animal cells. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(25), 66473-66485. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26848-y

Pérez Mendoza, C., Carrillo Castañeda, G., Vidal Lezama, E, & Ortiz García, E.. (2016). Efecto de la imbibición en la calidad fisiológica de semillas de jitomate. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *7*(7), 1765-1773. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000701765&lng=es&tlng=es.

Puraikalan, Y., & Scott, M. (2023). Sunflower seeds (helianthus Annuus) and health benefits: A review. *Recent Progress in Nutrition*, *3*(3), 1-5. doi:10.21926/rpn.2303010.

Puttha, R., Venkatachalam, K., Hanpakdeesakul, S., Wongsa, J., Parametthanuwat, T., Srean, P., ... & Charoenphun, N. (2023). *Exploring the potential of sunflowers: agronomy, applications, and opportunities within bio-circular-green economy*. Horticulturae, 9(10), 1079.

Rauf, S., Warburton, M., Naeem, A., & Kainat, W. (2020). Validated markers for sunflower (Helianthus annuus L.) breeding. *OCL*, *27*, 47. https://doi.org/10.1051/ocl/2020042

Ríos-Catota, D. V., Álvarez-Sánchez, A. R., & Vera-Rodríguez, J. H. (2025). Biosíntesis de nanopartículas de plata mediante Trichoderma asperellum y su impacto en el crecimiento vegetativo del maíz (Zea mays L.).*Multidisciplinary Collaborative Journal,3*(2), 148-158. https://doi.org/10.70881/mcj/v3/n2/57

Sales, H.B., de S.Carolino, A., de A. Nunes, R.Z., Macalia, C.M., Ruzo, C. M., da C. Pinto, C., de A. Bezerra, J., Campelo, P.H., Talu, S., de Souza, L.K.C., & Sanches, E. A. (2024). Advances in Agricultural Technology: A Review of Slow-Release Nanofertilizers and Innovative Carriers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *55*(12), 1849-1882. https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2326145

Vital-Vilchis, I., Quiñones-Aguilar, E.E., Hernández-Cuevas, L.V. & Rincón-Enríquez, G. (2020). Crecimiento de girasol ornamental en maceta a nivel de campo por efecto de hongos micorrízicos arbusculares. *Terra Latinoamericana*, *38*(3), 679-692. Epub 12 de enero de 2021. https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.715

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/