

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Aplicación de NPs-ZnO Modificadas con Maltodextrina
en el Cultivo de Cempasúchil (*Tagetes erecta*)

Por:

ANA DANIELA MEDINA ROBLES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México
Febrero 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Aplicación de NPs-ZnO Modificadas con Maltodextrina
en el Cultivo de Cempasúchil (*Tagetes erecta*)

Por:

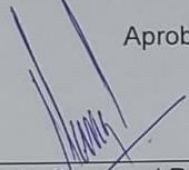
ANA DANIELA MEDINA ROBLES

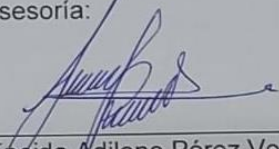
TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

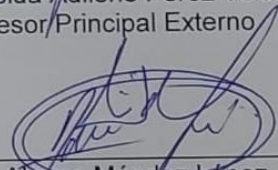
INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

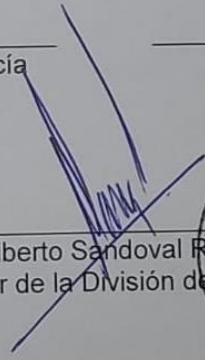
Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dr. Alberto Sandoval Rangel
Asesor Principal


Dra. Eneida Adilene Pérez Velasco
Asesor Principal Externo


Dra. Laura Raquel Luna García
Coasesor


Dr. Alonso Méndez López
Coasesor

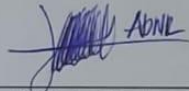

Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México.
Febrero 2025

Declaración de no plagio

El autor principal quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos: Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.



Ana Daniela Medina Robles
Nombre y firma

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a **Dios**, fuente de fortaleza y guía en cada paso de mi vida. Su luz me ha permitido superar los retos más difíciles y avanzar con esperanza en este camino académico.

A mi alma terra máter, **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por brindarme la oportunidad de formarme en un entorno académico de excelencia. Agradezco especialmente a los profesores y al personal que, con su dedicación y conocimiento, han contribuido a mi crecimiento profesional y personal.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al **Departamento de Horticultura** por brindarme las herramientas, el conocimiento y el apoyo necesario para llevar a cabo esta tesis.

Agradezco profundamente a los **docentes** y **personal administrativo** que, con su profesionalismo, dedicación y experiencia, han contribuido a mi formación académica. Cada clase, cada consejo y cada recomendación recibida han sido fundamentales para mi desarrollo y la realización de este proyecto.

A mis asesores de tesis, al **Dr. Alberto Sandoval Rangel**, a la **Dra. Eneida Adilene Pérez Velasco**, al **Dr. Alonso Méndez López** y al **Dr. Adalberto Benavides Mendoza**, quienes con su paciencia, orientación y sabiduría me ayudarán a darle forma a este proyecto. Su apoyo incondicional y compromiso fueron clave para llevar a cabo esta investigación a buen puerto.

A mis amigos de la carrera: **Carla García, Daysi Mejía, Vistrain Velázquez, Adrián Sánchez, Bernardo Lujan, Rodrigo López, Natalia Mendieta, Ana Salazar, yuleidy Martínez, Joshua Vargas, y a Luis Ángel (bocho)** quiero dedicar unas palabras de agradecimiento muy especiales. Desde el primer día, cada uno de ustedes ha sido una fuente constante de apoyo, inspiración y motivación. Gracias por compartir conmigo los momentos de estudio, las horas de trabajo intenso, pero también por las risas, las conversaciones y los ánimos cuando más lo necesitaba.

No solo hemos sido compañeros de clase, sino también amigos que han hecho este camino mucho más llevadero. Juntos hemos superado los retos y celebrado los logros, y me siento afortunada de haber tenido su compañía a lo largo de esta etapa.

Gracias por ser mi apoyo incondicional, por su generosidad y por creer en mí, incluso cuando yo misma dudaba de mis capacidades. Este logro es tanto mío como de ustedes, y siempre llevaré en mi corazón todo lo que compartimos.

Con todo mi cariño y gratitud, ¡gracias por ser parte esencial de este recorrido!

Dedicatorias

Dedico esta tesis **a mí misma**, por haber tenido la fortaleza y la determinación para llegar hasta aquí. A veces, el camino fue incierto, y la carga pesada, pero nunca perdí la esperanza de que cada paso me acercaba a este logro.

A mí por las noches sin dormir, los sacrificios y las dudas superadas. A mí por haberme levantado cada vez que caí y por haber creído en mis sueños, incluso cuando parecían lejanos.

Esta tesis es el reflejo de mi esfuerzo, mi dedicación y mi resiliencia. Me dedico este logro como un recordatorio de que soy capaz de alcanzar lo que me proponga, y de que cada desafío es una oportunidad de crecimiento.

A mí querido padre, **Francisco Medina Frías**, mi mentor, amigo y héroe. Siempre has sido el hombre perfecto ante mis ojos, el gran amor de mi vida, y la razón por la que daría absolutamente todo. Te amo con todo mi corazón.

Le agradezco a Dios por haberme dado un padre como tú. A lo largo de este recorrido, tú has sido mi motor, la fuerza que me ha impulsado a seguir adelante, especialmente en aquellos momentos en los que sentía que no podía continuar. Bastaba con recordar tu ejemplo y saber que todo estaría bien. Gracias por ser mi primer maestro, por ser mi roca en momentos difíciles y por mostrarme siempre el valor de luchar por mis sueños.

Esta tesis es una dedicación a ti, aunque sé que no será suficiente para reflejar todo lo que has hecho por mí. Sin embargo, está hecha con todo el amor y gratitud que siento.

Con cariño, tú hija, Ana.

A mi madre, **Gisela Robles Ruiz**, mi guía, mi apoyo y mi mejor amiga, mi más grande fuente de amor, fortaleza y sabiduría, quien ha sido mi más grande inspiración. Gracias a tu carácter inquebrantable y a tus sabios consejos, que en mi juventud no siempre lograba comprender, pero que hoy sé que siempre estuvieron guiados por tu amor y deseo de lo mejor para mí.

Hoy, con profundo orgullo, puedo afirmar que la mujer que soy es gracias a ti. Este proyecto es una humilde muestra de gratitud por todo lo que has hecho por mí, por cada sacrificio, cada palabra de aliento y cada enseñanza.

Te amo con todo mí ser, y dedico este trabajo a ti, como un reflejo del inmenso amor y admiración que siento.

Con cariño, tú hija, Ana.

Para mi segunda madre, **Avelina Baeza Bertadillo**, mi querida Veli preciosa. Gracias por cuidarme desde que tengo uso de razón, por ser una madre en todos los sentidos, sin importar las circunstancias. Tu amor incondicional, tus cuidados y tu guía han sido un faro en mi vida. Siempre has estado a mi lado, brindándome apoyo en los momentos más difíciles, y por ello te estaré eternamente agradecida.

Tu sabiduría, generosidad y paciencia han dejado una huella imborrable en mí, enseñándome lecciones que van más allá de lo académico. Me has mostrado el verdadero valor de la empatía, el esfuerzo y la perseverancia.

Hoy, le doy gracias a Dios por la dicha de tenerte en mi vida y por todo lo que me has enseñado. Esta tesis la dedico a ti, con todo mi amor y gratitud, como un pequeño homenaje a la madre extraordinaria que has sido para mí.

A mi hermano, **Francisco Medina Robles**, mi querido Paco. Gracias por ser mi compañero en cada etapa de mi vida, desde nuestra infancia llena de juegos y aventuras, pasando por nuestra adolescencia, hasta este momento en nuestra vida académica. Tu presencia siempre ha sido un motivo de alegría y una inspiración para seguir adelante, esforzándome por ser un buen ejemplo como tu hermana mayor.

Me siento profundamente orgullosa de ti y agradecida de tenerte en mi vida. Te quiero y amo con todo mi corazón. Aunque en ocasiones tengamos nuestras diferencias, siempre serás mi hermano, y estaré para ti incondicionalmente.

Con cariño, tú hermana, Ana.

A mi hermano menor, **Gustavo Medina Robles**, mi querido Gus. A pesar de que nos separan diez años de diferencia, has sido una fuente inagotable de amor y apoyo incondicional en mi vida. Gracias por estar siempre a mi lado, especialmente en los momentos en los que más lo he necesitado. Las tardes de videojuegos contigo me devolvían la alegría y la despreocupación de la infancia, haciéndome olvidar por un instante las responsabilidades de la adultez.

Desde el día en que naciste, llenaste mi vida de luz. Te quiero y amo profundamente, y aunque ya tengas 12 años, siempre serás mi hermanito, ese por quien velaré y cuidaré siempre. Durante este camino académico, fuiste una inspiración constante para esforzarme y ser un buen ejemplo como tu hermana mayor.

Con cariño, tú hermana, Ana.

A mi hermano mayor, **Hugo César Salazar Baeza**, mi gran ejemplo a seguir. Aunque no compartimos los mismos padres, siempre te he visto como el hermano mayor que nunca tuve. Has sido una de las principales motivaciones que me ha impulsado a esforzarme desde que tengo memoria. Tu inteligencia, bondad y excelencia como hijo, hermano y estudiante son admirables, y me inspiran a seguir adelante. Espero algún día llegar a ser como tú.

Te quiero y amo profundamente, y te agradezco por cada uno de los consejos que siempre has compartido conmigo. Esta tesis es un homenaje a ti, quien fuiste mi ejemplo e inspiración a lo largo de este camino.

Con todo mi cariño, tú hermana Ana.

A mi hermano, **Armando Salazar Baeza**. Gracias por regalarme una infancia llena de momentos inolvidables, introduciéndome al fascinante mundo de los videojuegos y compartiendo conmigo tantas risas y aventuras. Aunque no compartimos los mismos padres, siempre me ofreciste una amistad incondicional, convirtiéndote en un hermano en todo el sentido de la palabra.

Esta tesis está dedicada a ti como un pequeño gesto de gratitud por el amor y apoyo que siempre me brindaste, haciendo mi vida más colorida y especial.

Con cariño, tú hermana, Ana.

A mi hermano, **Miguel Ángel Salazar Baeza**. Para mí, siempre ha sido un ejemplo de cómo afrontar la vida con determinación y valentía, mostrando que, a veces, los sacrificios más grandes, como dejar atrás el hogar, la familia y los amigos, son necesarios para lograr una mejor calidad de vida.

Te agradezco profundamente por todo lo que has hecho por mí: desde los detalles que me enviabas durante mi infancia, tus sabios consejos cuando más los necesitaba, hasta el empleo que me ofreciste en un momento crucial. Por todo esto y más, dedico este proyecto a ti, como una pequeña muestra de mi gratitud y del inmenso cariño que tengo por la hermandad que siempre me brindaste.

Con cariño, tú hermana Ana.

A mi tío **Carlos Arellano Rodríguez**, Gracias por darme tu confianza y abrirme las puertas de tu hogar en Saltillo. Siempre creíste en mis capacidades y me ofreciste tu apoyo sin dudarlo en ningún momento. Tu generosidad y fe en mí han sido fundamentales en mi camino.

Con cariño, tu sobrina, Ana.

A mi tía **Remedios Robles Ruiz**, además de ser mi madrina, siempre fuiste una fuente constante de sabios consejos, apoyándome antes, durante y después de mi carrera profesional. Creíste en mis capacidades y me alentaste a seguir adelante, a esforzarme por ser mejor cada día, no solo como profesional, sino también como persona. Por todo eso y mucho más, dedico este proyecto a ti como una muestra de gratitud por tu amor, apoyo y confianza incondicional.

Con cariño, tú sobrina y ahijada, Ana.

A mi querida familia **Robles**, con especial mención a mis tías **Antonia y Elia**, y a mi prima **Mari Cruz**. Gracias de corazón por haberme acompañado con sus oraciones y pensamientos mientras estuve lejos de casa. Su fe en mí, su constante ánimo y el cálido

recibimiento en su hogar fueron fundamentales para que pudiera continuar en este camino. Este logro es también suyo.

Con todo mi cariño, Ana.

A mi prima **Jimena Medina Mendoza**, mi querida gorylover por ser más que familia y ser la hermana que nunca tuve, una amiga, confidente y un pilar en mi vida. Tu apoyo incondicional, tus palabras de aliento y la luz que siempre aportas a mi camino han sido esenciales en este logro. Te estimo profundamente, y no puedo agradecer lo suficiente por cada momento en el que estuviste para mí.

Con amor, Ana.

A mi mejor amiga de la carrera, **Carla García Gallegos (mi compa Bladi)**, mi inseparable compañera de este camino universitario, gracias por caminar conmigo en este viaje, por estar presente en los momentos de dudas, risas y retos. Tú apoyo constante, tu amistad incondicional y las incontables horas que compartimos estudiando, soñando y creciendo juntas han sido fundamentales para alcanzar este logro. Eres mucho más que una compañera de estudios; eres una hermana de vida. Esta tesis lleva tu huella, porque sin ti, este camino no habría sido el mismo.

Con todo mi cariño y gratitud, tú eterna amiga y hermana Ana.

A mis amigos de la vida: **Jimena Medina, Karla Mendoza, Jazmín Trejo, Angélica Ledesma y Brayan Elías Rodríguez**, porque desde el primer día que los conocí siempre han estado para mí y a pesar de no compartir el mismo camino su amistad siempre ha estado presente en momentos de alegrías y tristezas, es por eso que este trabajo también va dedicado a cada uno de ustedes.

Con amor, Ana.

A mis mascotas, **Keyla, Jaco, Brozzo, Rainer, Daysi, Lazy, Maki**.

Por su amor incondicional, su compañía constante y por ser mi refugio en los días más difíciles. Ustedes han sido una fuente de alegría, consuelo y motivación durante este

arduo proceso. Aunque no entienden las palabras, siempre han estado a mi lado, brindándome el apoyo más puro y fiel.

Este logro también es gracias a su presencia, que han hecho más ligeros los días de estudio.

Con todo mi cariño, Ana.

Contenido

Declaración de no plagio	¡Error! Marcador no definido.
Resumen	14
I. INTRODUCCIÓN	15
1.1 Objetivo	17
1.2 Hipótesis	17
II. LITERATURA REVISADA.....	18
2.1 Nanotecnología.....	18
2.1.1 Nanotecnología en medicina.....	19
2.1.2 Nanotecnología en cosméticos	20
2.1.3 Nanotecnología en industria alimentaria	20
2.1.4 Nanotecnología en industria textil.....	20
2.2 Nanotecnología aplicada a la agricultura	20
2.2.1 Nanopesticidas.....	21
2.2.2 Nanosensores	23
2.2.3 Nanofertilizantes	23
2.2.4 Recubrimientos superficiales de las NPs-ZnO	25
2.2.5 Interacción de NPs en las plantas	25
2.3 El Cultivo de Cempasúchil.....	27
2.3.1 Composición química.....	28
2.3.2 Morfología y características botánicas	28
III. MATERIALES Y MÉTODOS	30
3.1 Localización del área de estudio.....	30
3.2 Síntesis y modificación de NPs-ZnO	30

3.3. Caracterización de las nZnO.....	30
3.4 Material vegetal y aplicación de tratamientos.....	30
3.5 Variables evaluadas	31
3.6 Análisis estadístico	32
IV. Resultados y discusión.....	33
4.1 Caracterización de NPS-ZnO modificadas con MD	33
4.2 Efecto de las NPS-ZnO modificadas con MD en el crecimiento y desarrollo de la planta de cempasúchil	33
4.3 Efecto de las NPS-ZnO modificadas con MD en la calidad de la inflorescencia y parámetros fotosintéticos.....	35
V. Conclusión	40
VI. Literatura revisada.....	42

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar los efectos de diferentes concentraciones (0, 100, 250, 500 y 1000 mg L⁻¹) de nanopartículas de óxido de zinc (NPs- ZnO) modificadas con maltodextrina (MD) así como el efecto de dos formas de aplicación: foliar y drench en el crecimiento y calidad de floración de cempasúchil (*Tagetes erecta*). Las NPs-ZnO modificadas con MD influyeron significativamente en el crecimiento de la planta, con incrementos en altura (hasta 52.43%), diámetro de tallo (56.42%) y longitud de raíz (33.55%) en concentraciones de 100 mg L⁻¹ y 500 mg L⁻¹. La biomasa fresca y seca total aumentaron hasta 49% y 40.78%, respectivamente. La aplicación foliar favoreció el crecimiento en altura, mientras que la aplicación al drench fue más efectiva en biomasa y desarrollo radicular. En cuanto a la calidad de la flor, la altura de inflorescencia aumentó hasta 21.7% con 1000 mg L⁻¹, y el número de inflorescencias se duplicó con 100 mg L⁻¹ y 250 mg L⁻¹. El diámetro floral mejoró hasta 30.8% con 500 mg L⁻¹, mientras que las unidades SPAD y la tasa fotosintética incrementaron con aplicaciones foliares y al drench.

Palabras clave: cempasúchil, NPs-ZnO, maltodextrina, calidad, inflorescencia

I. INTRODUCCIÓN

La nanotecnología ha emergido como una disciplina revolucionaria en diversos campos, incluyendo la agricultura, al ofrecer soluciones innovadoras para mejorar la productividad y sostenibilidad de los cultivos (Liu and Lal 2015). En particular, las nanopartículas (NPs) han demostrado un potencial significativo en la mejora del crecimiento y desarrollo de plantas, tanto en cultivos hortícolas como ornamentales (Zeng et al. 2024).

Las NPs de óxido de zinc (ZnO) han captado la atención debido a sus propiedades multifuncionales, como su actividad antimicrobiana, capacidad de liberar zinc de manera controlada, y efectos positivos en la fisiología de las plantas. Estas partículas no solo contribuyen a la nutrición vegetal al suministrar zinc, un micronutriente esencial, sino que también pueden actuar como reguladores del crecimiento, modulando procesos como la fotosíntesis, la absorción de agua y nutrientes, y la síntesis de metabolitos secundarios (Pérez Velasco et al. 2020). El zinc es un micronutriente esencial para las plantas, involucrado en procesos como la síntesis de clorofila, la activación de enzimas y la protección contra el estrés oxidativo (Marschner 2011).

En cultivos hortícolas, se ha demostrado que las NPs-ZnO mejoran la germinación de semillas, incrementan el rendimiento y la calidad de los frutos, y fortalecen las defensas naturales de las plantas, por ejemplo, en estudios publicados se demostró que usando NPs-ZnO en frijol aumentó la actividad de enzimas como fosfatasa ácida, fosfatasa alcalina y fitasa, además las plantas de frijol aumentaron su contenido de fósforo, aumentaron su biomasa (27%) y la producción de grano incrementó 6% comparado con plantas tratadas con fertilización convencional (Dhoke, Mahajan, and Khanna 2011), otro estudio en *Lactuca sativa* reportó que la aplicación foliar de NPs-ZnO aumentó el contenido de zinc en las plantas, mejoró la actividad enzimática antioxidante y promovió un mayor rendimiento (Fortis-Hernández et al. 2022).

Por otro lado, en el caso de cultivos ornamentales, la aplicación de las NPs-ZnO busca incrementar la resistencia a factores bióticos y abióticos, así como incrementar la productividad y calidad de las flores que son factores esenciales para maximizar su valor ornamental y comercial (Zeng et al. 2024). En el cempasúchil (*Tagetes erecta*), una planta ornamental de alta relevancia cultural y económica en diversas regiones, el uso

de NPs-ZnO puede representar una estrategia innovadora para optimizar su producción ya que se ha identificado que posee propiedades relevantes, incluyendo efectos antiinflamatorios, antiparasitarios y anticancerígenos. Actualmente, el cempasúchil es reconocida a nivel global por su abundancia en carotenoides, compuestos versátiles que también se emplean en la formulación de alimentos para aves de corral y suplementos nutricionales (López Estrada, Chang, and Heinrich 2024). El cempasúchil es conocido por su color vibrante y su uso tradicional en festividades como el Día de Muertos en México, además de su potencial como fuente de compuestos bioactivos, como los carotenoides, que poseen aplicaciones industriales y farmacéuticas.

En este contexto, nuestra investigación de la aplicación de las NPs-ZnO en cempasúchil busca explorar sus efectos sobre el crecimiento y desarrollo de la planta, incluyendo parámetros como la altura, el número de hojas, la tasa de fotosíntesis, y la producción de flores, sin embargo, a pesar de los avances en investigaciones realizadas, aún quedan desafíos por superar para lograr una adopción masiva de estas tecnologías en la agricultura. Entre ellos, destacan la necesidad de entender mejor los mecanismos de acción de las NPs en diferentes tipos de plantas, la evaluación de su impacto ambiental a largo plazo, y el desarrollo de métodos de síntesis económicos y ecológicos. Además, es fundamental generar regulaciones claras y consensuadas que garanticen la seguridad de su aplicación, tanto para los productores como para los consumidores y el medio ambiente.

La integración de la nanotecnología en la agricultura ,particularmente mediante el uso de NPs-ZnO en cultivos hortícolas y ornamentales ,representa un enfoque prometedor para enfrentar los desafíos del siglo XXI.Este campo de estudio no solo contribuye al avance científico y tecnológico , sino que también ofrece soluciones prácticas para mejorar la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas agrícolas .El cempasúchil ,como modelo de planta ornamental ,es un ejemplo claro de cómo la nanotecnología puede transformar la producción agrícola ,aportando beneficios tanto a nivel económico como ambiental representando una herramienta prometedora para mejorar el crecimiento y la calidad de los cultivos.

1.1 Objetivo

Evaluar el efecto de la concentración y la forma de aplicación de las NPs-ZnO en el cultivo de cempasúchil.

1.2 Hipótesis

La aplicación de NPs-ZnO estimulará el crecimiento y desarrollo, así como la calidad del cultivo de *Tagetes erecta*.

II. LITERATURA REVISADA

2.1 Nanotecnología

La nanotecnología se basa en el estudio y manipulación de la materia a escalas nanométricas, específicamente entre 1 y 100 nanómetros, donde las propiedades emergentes posibilitan el desarrollo de aplicaciones innovadoras (Dubey & Mailapalli, 2016). La nanotecnología puede definirse de manera sucinta como "ingeniería con precisión atómica", aunque esta definición no aborda explícitamente características esenciales como la generación de propiedades novedosas o únicas. Estos aspectos distintivos son destacados por los nanotecnólogos, quienes buscan diferenciar la nanotecnología de estructuras convencionales de tamaño reducido (Sangeetha et al., 2017).

El término "nanómetro" fue introducido por Richard Zsigmondy, ganador del Premio Nobel de Química en 1925, como una herramienta para describir las dimensiones de partículas microscópicas. Zsigmondy destacó por ser pionero en la medición del tamaño de partículas, como los coloides de oro, empleando técnicas avanzadas de microscopía (Hulla et al., 2015).

La nanotecnología tiene una amplia gama de aplicaciones en sectores (Figura 1) como la medicina y la farmacéutica, destacándose en sistemas de administración de fármacos, otras áreas de aplicación son cosmetología e industria de alimentos (Nasrollahzadeh et al., 2019).

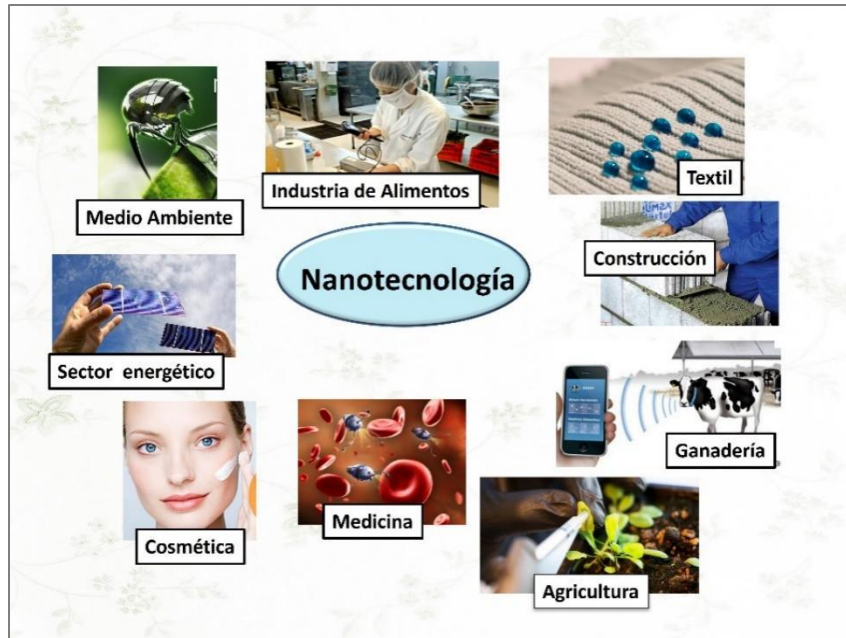


Figura 1. Aplicaciones de Nanotecnología en algunos sectores.

2.1.1 Nanotecnología en medicina

La nanotecnología ha revolucionado la medicina al proporcionar herramientas a escala nanométrica capaces de mejorar el diagnóstico, la terapia y la prevención de enfermedades. Su impacto se basa en la capacidad de manipular materiales a nivel molecular y atómico, permitiendo la creación de sistemas altamente específicos y eficientes (Gómez López, 2017). En la Figura 2 se ejemplifican los avances más destacados de la nanomedicina (Abdussalam-Mohammed, 2019; Pájaro Castro et al., 2013; Zdrojewicz et al., 2015).

Diagnostico	Terapeutica	Administracion de farmacos	Medicina regenerativa
• Imagenes por resonancia magnetica. • Tomografia por emision de positrones. • Tomografia computarizada.	• Nanoparticulas antimicrobianas • Nanoparticulas en la terapia contra el cancer. • Nanoparticulas en la terapia antidiabetica.	• Nanoparticulas polimericas. • Liposomas. • Micelas. • Nanoparticulas hibridas	• Policaprolactona mezclada con NPs-Au • Nanohidroxiapatita

Figura 2. Aplicaciones de la nanotecnología en diferentes áreas multidisciplinarias de la medicina.

2.1.2 Nanotecnología en cosméticos

Productos para el cuidado de la piel como cremas solares están diseñadas para proteger la piel de la radiación ultravioleta, y sus ingredientes activos incluyen óxidos metálicos como el óxido de zinc (ZnO) y el dióxido de titanio (TiO₂) en forma de micropartículas insolubles (Nuzhatun Nisa, 2015). Las formulaciones de protectores solares que emplean NPs-TiO₂ son menos grasas, más transparentes, con un aroma reducido y visualmente atractivas. Asimismo, evitan el residuo blanco que aparece al usar partículas más grandes (Ekpa Effiong et al., 2020).

2.1.3 Nanotecnología en industria alimentaria

Los envases de alimentos desarrollados con nanotecnología, denominados “inteligentes” y “activos”, presentan ventajas significativas en comparación con los métodos convencionales, como materiales con mayor resistencia mecánica, mejores propiedades de barrera, películas antimicrobianas y nanodetectores que identifican patógenos y alertan a los consumidores sobre la seguridad de los alimentos (Mohammad et al., 2022; Thiruvengadam et al., 2018).

2.1.4 Nanotecnología en industria textil

La incorporación de nanomateriales ha permitido la creación de tejidos más ligeros y resistentes, ideales para aplicaciones en ropa deportiva y equipos de protección. Asimismo, la nanotecnología ha abierto nuevas posibilidades en el diseño de moda, como tejidos que cambian de color o emiten luz, ofreciendo opciones estéticas innovadoras. Estas aplicaciones no solo mejoran el rendimiento y la funcionalidad de los textiles, sino que también contribuyen a la sostenibilidad al reducir la necesidad de lavado frecuente y prolongar la vida útil de las prendas (Shah et al., 2022). Entre los agentes antimicrobianos empleados, el TiO₂ se destaca como uno de los más utilizados. Se ha reportado que el quitosano también posee agentes antimicrobianos importantes para esta industria (Shahid-ul-Islam & Butola, 2019).

2.2 Nanotecnología aplicada a la agricultura

En el contexto de la agricultura moderna, se postula que esta disciplina tiene el potencial de transformar profundamente los sistemas agrícolas, ofreciendo nuevas soluciones para mejorar la eficiencia, sostenibilidad y productividad de los cultivos, esto gracias a su

reducido tamaño y propiedades únicas, ya que interactúan de una manera directa y eficaz con los sistemas biológicos, promoviendo procesos fisiológicos y metabólicos que potencian el crecimiento vegetal (Saldivar et al., 2018).

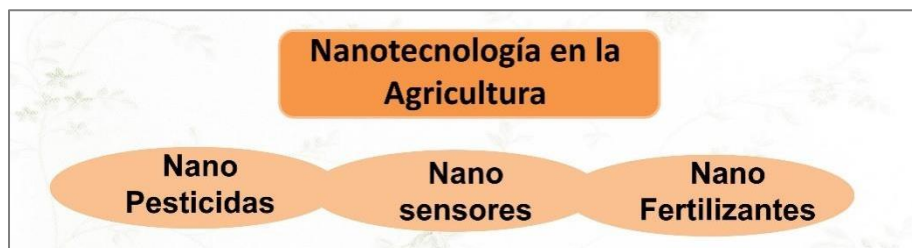


Figura 3. Aplicaciones principales de la nanotecnología en la agricultura.

2.2.1 Nanopesticidas

Los nanopesticidas son sustancias diseñadas para controlar insectos, bacterias y malezas, producidas mediante métodos físicos, fisicoquímicos y químicos a escala nanométrica. Su clasificación actual se basa principalmente en el tamaño de las partículas, aunque aún no existe una definición (Yin et al., 2023).

El uso excesivo de herbicidas como el glifosato y otros productos químicos en la agricultura convencional ha generado un impacto ambiental significativo y perjudicial, lo que ha llevado a un incremento en los niveles de residuos de herbicidas en el agua superficial y subterránea, el suelo y los alimentos (Clapp, 2021). Los nanoherbicidas se están desarrollando como una herramienta para enfrentar los retos en el control de malezas perennes y la gestión del banco de semillas en el suelo. Se han realizado estudios sobre la liberación controlada de herbicidas para reducir los daños a los humanos y al medio ambiente. Los nanoencapsulados de herbicidas como atrazina, triazina y ametrina, al ser probados, lograron una eficiencia del 84% en su liberación hacia las plantas (Pereira et al., 2014). En otro estudio la encapsulación de Paraquat en matrices poliméricas de nanopartículas genera una liberación más lenta en comparación con su forma libre, alcanzando solo un 70% de liberación en condiciones de laboratorio frente al 92% del herbicida libre (Grillo et al., 2014). Además, esta liberación es aún más limitada en condiciones de campo debido a factores como la baja humedad y la interacción con la materia orgánica del suelo.

Nanofungicidas

Diversos nanomateriales han exhibido una notable actividad antifúngica, lo que los posiciona como una alternativa prometedora para el control de hongos fitopatógenos. En particular, las nanopartículas metálicas como plata (Ag), oro (Au) y zinc (Zn) han sido objeto de numerosos estudios debido a sus destacadas propiedades antifúngicas, obteniendo resultados significativos en ensayos experimentales. Hasta la fecha, se han sintetizado y evaluado distintas nanopartículas metálicas, incluyendo aquellas de plata, cobre y óxido de zinc, demostrando eficacia contra una amplia variedad de hongos fitopatógenos (Cruz-Luna et al., 2021).

Por ejemplo, la aplicación de nanosilicio (NPs-SiO₂) en el cultivo de maíz incrementó la resistencia a *Fusarium oxysporum* y *Aspergillus niger* en comparación con el Si convencional (Suriyaprabha et al., 2014). En otro estudio se reportó que las NPs-Ag disminuyeron el crecimiento micelial y la esporulación de las conidias de *Fusarium esqueti* (Matras et al., 2022). Asimismo, las NPs-ZnO destacan por su capacidad para combatir hongos fitopatógenos responsables de enfermedades como el tizón tardío y la podredumbre en hortalizas (Boxi et al., 2016). Esto las convierte en una herramienta prometedora para su uso como nanofungicidas en la agricultura y la industria alimentaria, permitiendo su integración en estrategias adicionales para el control de enfermedades vegetales (Krishna & Golla, 2023). Otra investigación reportó que las NPs-ZnO inhibieron el crecimiento de *B. cinerea* en un 58 % después de 24 horas de tratamiento, utilizando una concentración de $5 \times 10^{-3} \text{M}$ (Kairyte et al., 2013).

Nanoinsecticidas

Los nanoinsecticidas representan una estrategia innovadora y eficiente para el control de plagas en plantas mediante el uso de nanotecnología, como lo han demostrado múltiples investigaciones. Su eficacia superior frente a los insecticidas convencionales se debe a su capacidad para estabilizar las moléculas activas, reducir su degradación y permitir una liberación controlada y prolongada del principio activo. Esto no solo mejora la efectividad en el control de plagas, sino que también reduce la cantidad de producto necesaria, minimizando los riesgos de fitotoxicidad y la acumulación de residuos en el ambiente (Baker et al., 2017). Además, la encapsulación de insecticidas en

nanopartículas favorece su adhesión a las superficies foliares, evitando la lixiviación y aumentando su persistencia en el ecosistema agrícola. Investigaciones recientes han explorado la combinación de nanoinsecticidas con biopolímeros y compuestos naturales, lo que podría potenciar su selectividad, disminuir la resistencia de los insectos y contribuir a una agricultura más sostenible (Nuruzzaman et al., 2016). Un estudio realizado, reportó que la aplicación de NPs de óxido de aluminio (Al_2O_3) incrementó 95% la mortalidad en *Rhyzopertha dominica* y *Sitophilus oryzae* L. (Stadler et al., 2010). Asimismo, la aplicación de NPs- SiO_2 y NPs-Au resultaron efectivas en un 100% y 83%, respectivamente, en el control de *Callosobruchus maculatus* (Rouhani et al., 2013).

2.2.2 Nanosensores

Los nanosensores y los sistemas de suministro inteligentes que utilizan nanoproductos son aplicaciones clave de la nanotecnología en la agricultura. Estos sistemas se implementan para combatir los patógenos que afectan los cultivos, minimizar las pérdidas de nutrientes durante la fertilización y aumentar la productividad agrícola mediante una gestión más eficiente del agua y los nutrientes (Dubey & Mailapalli, 2016; Mushtaq & Faizan, 2021). Los nanosensores presentan beneficios sobresalientes, como una mayor sensibilidad de detección, especificidad mejorada y aplicaciones significativas en diversos campos. Estos incluyen el control de bioprocesos, la conservación, la detección y el tratamiento de infecciones en plantas, así como el transporte dirigido de componentes dinámicos a ubicaciones específicas (Srilatha, 2011).

Un ejemplo es el nanoelectrodo de oro modificado con nanopartículas de cobre permite una detección precisa de los niveles de ácido salicílico en la colza infectados por el patógeno fúngico *Sclerotinia sclerotiorum* (Simonian et al., 2005). En arroz se desarrolló un nanosensor con NPs de Zn para detectar residuos pesticidas (Wang et al., 2023).

2.2.3 Nanofertilizantes

Los fertilizantes nitrogenados son los que se usan de una manera incontrolada y/o excesiva, esto ha causado una acumulación de nitratos a un nivel tóxico en aguas subterráneas (Dubrovsky & Hamilton, 2010). Se ha informado que entre un 50% y 70% de los insumos químicos no se utilizan por que se pierden por lixiviación o mineralización (Dubey & Mailapalli, 2016). De aquí surge la necesidad de desarrollar un sistema de

nutrición vegetal más eficiente, convertir las prácticas agrícolas convencionales en prácticas inteligentes mediante la participación de tecnologías avanzadas. Los investigadores alrededor del mundo han instado en desarrollar y promover el uso de NFs que podrían servir como nutrientes para las plantas, mejorar las tasas de germinación, crecimiento, rendimiento y muchos parámetros fisiológicos (Liu & Lal, 2015).

Diversos estudios han reportado efectos positivos de la aplicación de nanofertilizantes en los cultivos, por ejemplo, las NPs de calcio (Ca) y NPs de fósforo (P) mostraron un incremento de 20% y 33%, respectivamente, en el rendimiento de semilla de *Glycine max* en comparación con los fertilizantes convencionales (Liu & Lal, 2014). Otro estudio desarrolló NPs de magnesio (Mg) y hierro (Fe) como alternativa a los convencionales y obtuvieron un incremento del 7% en el peso de la semilla de *Vigna unguiculata* y un aumento del 10% en el contenido de clorofila en las hojas (Delfani et al., 2014). Las NPs de manganeso (Mn) en el cultivo de *Vigna radiata* aumentaron en 52% la longitud de la raíz, 38% de longitud de brote y 38% la biomasa (Pradhan et al., 2013). Las NPs de cobre (Cu) han reportado un aumento de 35% la fotosíntesis en algas *Egeria densa* (Nekrasova et al., 2011) y aumentó un 40% el crecimiento de lechuga (Shah & Belozeroova, 2009). Respecto al Zn, es un micronutriente esencial encargado de regular las actividades enzimáticas en las plantas, en estudios con aplicación de ZnO mostraron una mejora significativa en la biomasa, longitud de raíz, contenido de clorofila y proteína, y actividad enzimática (fosfatasa) en *Vigna radiata*, *Cicer arietinum*, *Cucumis sativus*, *Raphanus sativus*, *Brassica napus* y frijol cluster (Dhoke et al., 2011; Lin & Xing, 2008; Raliya & Tarafdar, 2013). Muchos investigadores han enfocado su atención en los efectos de las NPs-ZnO en el crecimiento y productividad de los cultivos empleando, de tal forma que de todos los micronutrientes el Zn es el elemento más estudiado. En otro experimento de invernadero con el cultivo de pepino (*Cucumis sativus*) se demostró un aumento de 10% entre y 60% en la masa seca de la raíz de la planta con la aplicación de 400 y 800 mg kg⁻¹, respectivamente, en comparación con un tratamiento sin aplicación de NPs de ZnO (Zhao et al., 2014).

2.2.4 Recubrimientos superficiales de las NPs-ZnO

Los polisacáridos se utilizan habitualmente para recubrir NPs metálicas, ya que pueden proporcionar biocompatibilidad, estabilidad e interacciones específicas con las nanopartículas. Algunos de los polisacáridos más utilizados para este fin son:

Los polisacáridos como la celulosa, el quitosano, el almidón y el alginato destacan como recubrimientos esenciales para NPs metálicas debido a su biocompatibilidad, biodegradabilidad y capacidad para regular la liberación de los nanomateriales. La celulosa, ampliamente utilizada, mejora la estabilidad y dispersión de NPs metálicas, particularmente de óxidos metálicos. Por su parte, el quitosano, derivado de la quitina, se emplea comúnmente en coberturas debido a sus propiedades antimicrobianas y su idoneidad para aplicaciones agrícolas. Asimismo, el almidón y el alginato permiten la formación de películas protectoras que encapsulan las nanopartículas, contribuyendo a una estrategia sostenible en sectores (Plucinski et al., 2021). La maltodextrina es un polisacárido derivado de la hidrólisis del almidón que se usa en múltiples áreas de la industria (Yang et al., 2022). Estudios recientes indican el poder bioestimulante que la maltodextrina puede generar en cultivos como el tomate y lechuga, logrando aumentar biomasa fresca, altura de la planta y su rendimiento (Pérez Velasco et al., 2020; Pérez-Velasco et al., 2021).

2.2.5 Interacción de NPs en las plantas

Los datos de las investigaciones recabadas sugieren que las NPs pueden entrar a la célula formando compuestos orgánicos del exudado de la raíz, uniéndose a proteínas transportadoras (acuaporinas) o canales iónicos y una vez dentro pueden ser transportados vía simplasto o apoplasto (Rico et al., 2011) (Figura 4). La penetración de las NPs comienza cuando éstas entran en contacto con la pared celular semipermeable de las plantas esta actúa como un tamiz con poros de tamaño nanométrico que restringen el paso de partículas foráneas, se sabe también que las NPs suelen ser persistentes, ya que no se degradan y permanecen en el sistema originando la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) causando daño oxidativo del ADN, cuando las NPs entran en contacto con la célula causan daño estructural de la mitocondria (Mohammed et al., 2015).

El comportamiento y la movilidad de las NPs en las plantas dependen de su concentración, tamaño, estabilidad, modificaciones estructurales, química superficial y de la especie vegetal en la que se aplican. Durante su interacción con los tejidos vegetales, las NPs pueden ingresar a las partes aéreas a través de estructuras naturales como estomas e hidátodos, así como mediante heridas o por penetración directa. Una vez dentro, tienden a acumularse en la región subestomática y pueden ser transportadas sistémicamente a través del floema y el xilema (Singh et al., 2018).

La translocación de las NPs en la planta sigue dos rutas principales: a través del floema, donde el transporte es bidireccional, permitiendo su redistribución a tejidos en desarrollo, y a través del xilema, donde el movimiento es unidireccional, ascendiendo desde las raíces hacia los órganos aéreos. Factores como la morfología de la planta, la composición química de las NPs y las interacciones planta-NP influyen en su absorción, movilidad y acumulación. Además, los mecanismos de transporte activo y pasivo determinan su biodisponibilidad y su posible impacto en el metabolismo vegetal, lo que puede influir tanto en la eficiencia de su aplicación como en la respuesta fisiológica de la planta.

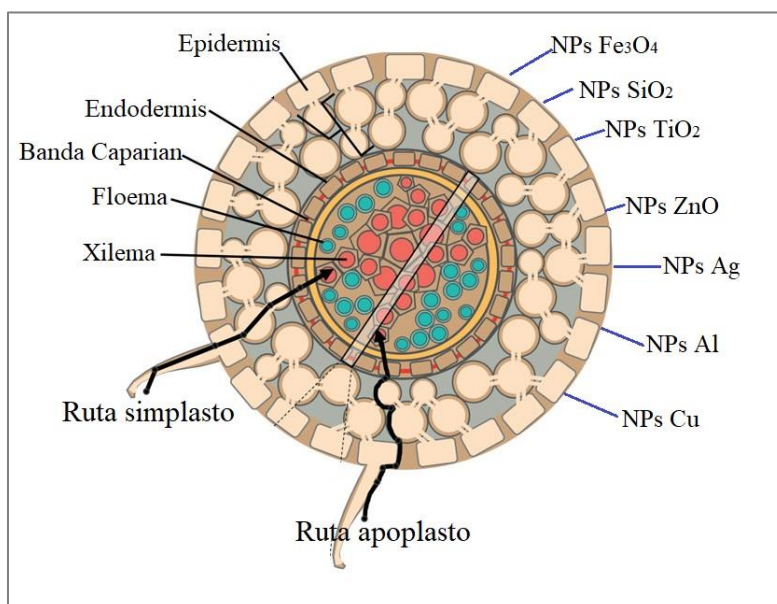


Figura 4. Zonas de posible de absorción de la raíz (corte transversal).

Ahora bien, la aplicación de NPs puede, también entrar a los tejidos vegetales cuando se aplican de manera foliar por aspersión (Jalali et al., 2017) y de esta manera penetran

por aperturas naturales de las hojas (Figura 6) para posteriormente desplazarse por la vía del floema hacia los diferentes órganos de las plantas (Jalali et al., 2017). Es necesario señalar que se deben aplicar NPs de un tamaño inferior a los 50nm para que su ingreso por estomas sea fácil, las estomas pueden llegar a medir de 10-60µm, se ha reportado que la penetración de NPs vía estomática aumenta la actividad metabólica celular (Eichert et al., 2008).

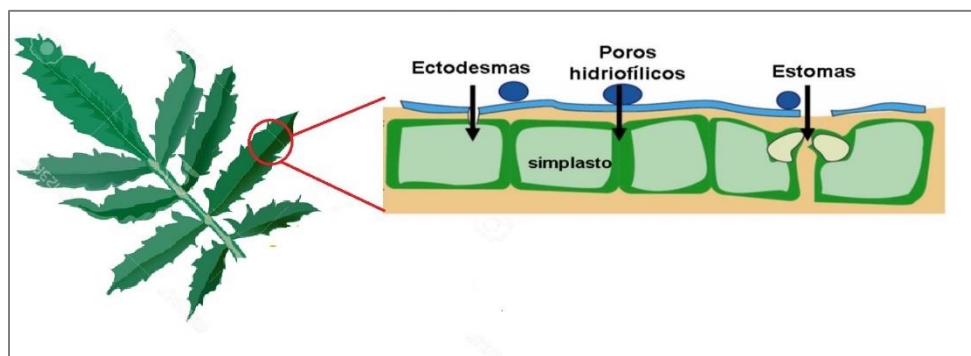


Figura 5. Zonas de posible de absorción en las hojas.

2.3 El Cultivo de Cempasúchil

El cempasúchil (*Tagetes erecta*) es una planta anual de la familia de las Asteraceae, originaria de México, donde se han documentado la presencia de 35 variedades de la flor de cempasúchil de un total de 58 variedades conocidas (Maldonado-Bonilla et al., 2021). Las flores han jugado un papel significativo en la vida cotidiana de las sociedades humanas a lo largo de la historia, con usos que abarcan desde su aplicación en la alimentación y la medicina tradicional hasta su empleo en la ornamentación. Asimismo, su presencia en ofrendas y altares en diversos rituales religiosos destaca su relevancia cultural y simbólica en distintas prácticas sociales y espirituales (López Estrada et al., 2024; Serrato Cruz, 2022).

Esta planta tiene una relevancia considerable en la economía nacional, no solo por su demanda comercial en la celebración del Día de Muertos, sino también por sus propiedades medicinales y agronómicas. La demanda de la flor de cempasúchil aumenta notablemente en octubre y noviembre debido a la festividad del Día de Muertos, alcanzando en Tempoal un valor económico aproximado de MXM\$89,500.00 (Barajas-

Rodríguez et al., 2021). México es considerado el centro de origen de la flor de cempasúchil y continúa siendo el cuarto mayor productor mundial de esta planta.

2.3.1 Composición química

El cempasúchil (*Tagetes erecta* L.) contiene aceites esenciales con una composición química rica en monoterpenos y sesquiterpenoides, destacándose compuestos como piperitona, piperitenona, ocimina, neofitadieno y cariofileno. Estas sustancias han demostrado poseer propiedades fitotóxicas, lo que ha despertado interés en su uso como alternativa natural a los herbicidas sintéticos en la agricultura (Hooks et al., 2010).

Los aceites esenciales extraídos de *T. erecta* han sido formulados para aplicaciones herbicidas, mostrando efectos tanto en la inhibición de la germinación de semillas como en el desarrollo de plántulas de malezas. Su acción se debe a la interferencia en procesos fisiológicos clave, como la actividad enzimática y la fotosíntesis, lo que afecta la viabilidad de las plantas no deseadas (Laosinwattana et al., 2018). Además, estos aceites esenciales pueden alterar la integridad de las membranas celulares de las malezas, provocando marchitamiento y desecación del tejido vegetal. Gracias a estas propiedades, *T. erecta* se perfila como una fuente prometedora de bioherbicidas sostenibles, reduciendo el impacto ambiental asociado al uso de agroquímicos convencionales.

Diversas investigaciones han vinculado a los carotenoides con la prevención de enfermedades oculares relacionadas con la edad, tales como las cataratas y la degeneración macular. Estos estudios han arrojado resultados prometedores que han impulsado el desarrollo de otras áreas de investigación relacionadas, como la optimización de carotenoides para su incorporación en alimentos de consumo masivo mediante técnicas de ingeniería genética (Angélica Del Villar-Martínez et al., 2007).

2.3.2 Morfología y características botánicas

Hojas: son de tipo pinnado, presentan divisiones profundas y tienen un color verde oscuro. Al ser frotadas o trituradas, emiten un aroma característico que distingue a esta especie.

Flores: la planta desarrolla grandes flores en forma de capítulos dobles y globulares con tonalidades abarcan desde amarillo y naranja vibrantes hasta blanco. Además, estas flores desprenden un aroma particular que atrae a polinizadores como abejas y mariposas.

Semillas: son de color negro con puntas acuminadas, unidas entre sí, presentan un tamaño de 7 a 10 mm.

Tallo: es robusto, angular y carece de pelos, lo que le permite sostener eficazmente las flores, incluso las más pesadas.

Raíces: es de tipo fibroso, lo que facilita su adaptación a diferentes tipos de suelo.

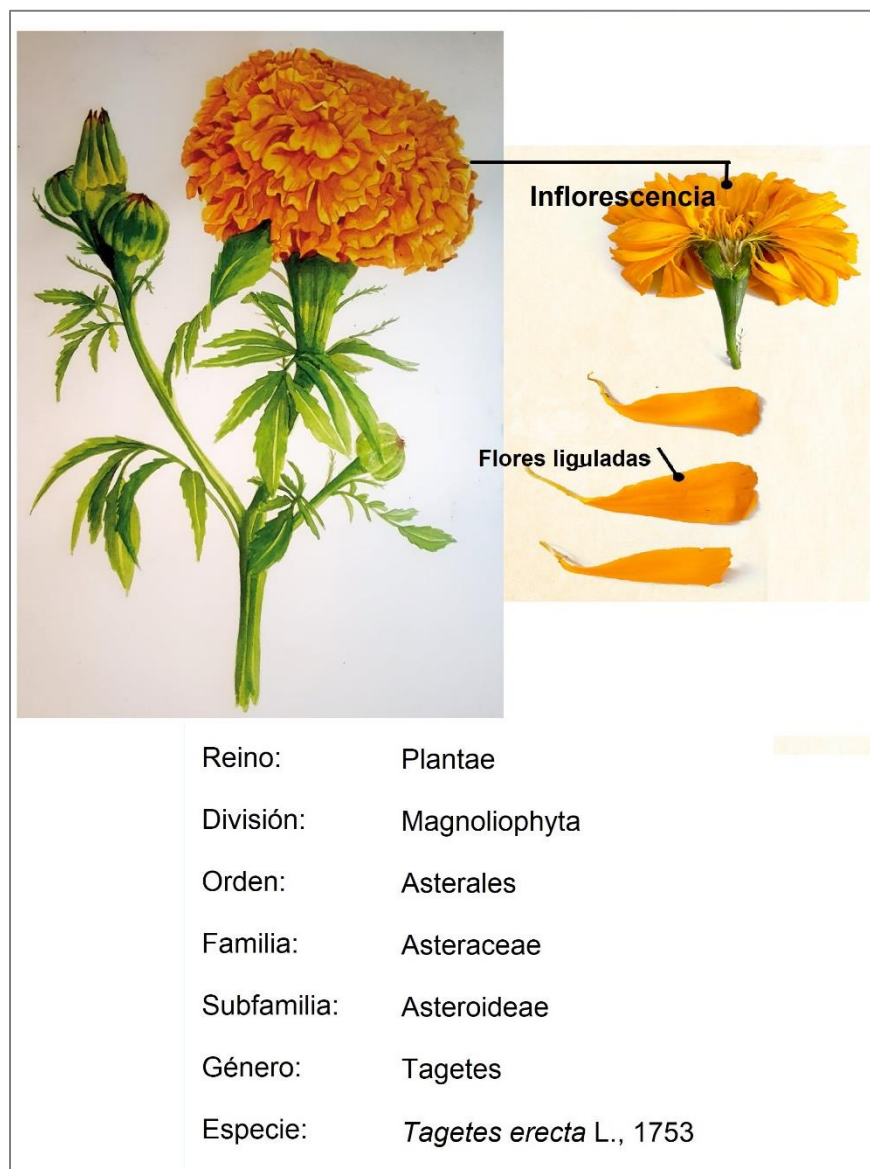


Figura 6. Ilustración de la planta e inflorescencia de cempasúchil y su taxonomía.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del área de estudio.

El experimento se realizó en uno de los invernaderos en área perteneciente al departamento de horticultura, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en la Ciudad de Saltillo, Coahuila, México, con las coordenadas geográficas 25°21'21.6"Norte 101°02'07.7"Oeste, 1610 msnm. El clima en la región suele ser semi-seco, templado durante gran parte del año, y con precipitaciones medias anuales de 400

3.2 Síntesis y modificación de NPs-ZnO

Se realizó en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) mediante el método de precipitación descrito por Pérez-Velasco et al. (2021). Para ello, se emplearon reactivos de alta pureza, incluyendo acetato de zinc dihidratado como precursor, disuelto en una mezcla de agua desionizada, etanol, n-propilamina y trietilamina. La reacción se llevó a cabo a 65 °C bajo reflujo con agitación constante durante 12 H. La modificación superficial de las nZnO se realizó con MD utilizando el mismo método de precipitación. Se preparó una solución con NPs-ZnO y MD en relación 1:1 en etanol, sometida a reflujo a 65 °C por 6 horas. Tras enfriamiento, la mezcla fue lavada con etanol y las nZnO modificadas se recuperaron por centrifugación, mejorando su estabilidad y funcionalidad.

3.3. Caracterización de las nZnO

La estructura cristalina de las NPs-ZnO se determinó mediante difracción de rayos X (XRD) utilizando un difractómetro (Siemens D-5000, Munich, GER). La morfología y distribución de tamaño de partícula se examinó a través de microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM) (FEI Titan 80 - 300 kV HRTEM, Hillsboro, OR, EE. UU.). La identificación los grupos funcionales se realizó mediante espectroscopia de infrarrojo (espectrómetro FT-IR, Thermo Scientific-Nicolet iS50).

3.4 Material vegetal y aplicación de tratamientos

Se empleó el material híbrido Mari Gold F1 Big Duck Orange, las cuales se sembraron en charolas de poliestireno de 200 cavidades. Se utilizó una mezcla de peat moss y perlita (1:1, v/v) como sustrato. Posteriormente, para el trasplante se utilizaron contenedores con capacidad de 4 L y como sustrato se usó suelo recolectado del lugar de estudio y fibra de coco en relación 1:1 (v/v). El cultivo se manejó durante un ciclo de

120 días bajo condiciones de invernadero, para la nutrición se empleó una solución Steiner ajustada respecto a la fenología del cultivo con un sistema de riego localizado tipo espagueti. Los tratamientos evaluados incluyeron cinco concentraciones de NPs-ZnO modificadas con maltodextrina (0, 100, 250, 500 y 1000 mg L⁻¹) y dos formas de aplicación (drench y foliar) lo que resultó en un total de 10 tratamientos.

La aplicación por vía drench se realizó dos días después del trasplante y se utilizaron 50 mL de solución de ZnO-NPs en las concentraciones bajo estudio, asimismo, la aplicación foliar se llevó a cabo manualmente con un atomizador, utilizando 50 mL cubriendo totalmente las hojas con la solución de NPs-ZnO.

3.5 Variables evaluadas

Para medir la altura de la planta y la longitud de la raíz se usó un flexómetro (TRUPER). El diámetro de tallo se midió en la base del tallo principal, a una altura aproximada de 2 cm sobre la superficie del sustrato, colocando las mordazas del vernier digital (STAINLESS) alrededor del tallo, asegurando un ajuste preciso sin comprimir el tejido vegetal. El valor registrado correspondió al diámetro en milímetros. El diámetro floral se midió tomando el diámetro máximo de la inflorescencia completamente abierta, se posicionó el vernier digital de manera horizontal, asegurando que las puntas de las mordazas estuvieran en contacto con los extremos opuestos del capítulo floral. El parámetro de altura de la inflorescencia se determinó desde la base del pedúnculo floral hasta el punto más alto de la inflorescencia. Para el peso fresco de los órganos vegetales se utilizó una balanza digital (CGOLDENWALL), para el peso seco el material vegetal se sometió proceso de secado en una estufa (THERMO SCIENTIFIC) a una temperatura de 65 °C por 48 h. Transcurrido este tiempo, se tomó el registro del peso seco, para esto se utilizó una balanza digital (CGOLDENWALL). Las unidades SPAD se midieron con la ayuda de un Medidor de clorofila (KONICA MINOLTA 502) realizando la medición entre las 10 am y 12 pm con presencia de luz solar al máximo. El número de inflorescencias o número de flores por planta se registró contando todas las inflorescencias completamente abiertas en cada planta durante todo el ciclo del cultivo. Finalmente, la tasa fotosintética se midió con un sistema portátil de fotosíntesis (LI-COR 6400XT, Biosciences) en hojas sanas y expuestas a la luz solar directa entre las 10 am y 12 pm,

las condiciones ambientales en la cámara se mantuvieron a una concentración de CO₂ de 390.4 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, la temperatura del aire se mantuvo a 34.4°C, y la humedad relativa se mantuvo en 58.4%.

3.6 Análisis estadístico

Se empleó un diseño de bloques completamente al azar con un arreglo factorial 5x2 con tres repeticiones por tratamiento y cuatro plántulas por repetición. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANVA) y cuando se detectó significancia se realizó una prueba de comparación de medias múltiples utilizando el procedimiento de Tukey ($p \leq 0.05$) utilizando el software SAS v9.0.

IV. Resultados y discusión

4.1 Caracterización de NPS-ZnO modificadas con MD

Los ángulos detectados en los patrones de DRX de las NPs-ZnO corresponden a la estructura tipo wurzita indicando una alta pureza (JCPDS 36-1451) (Figura 7a). Las HRTEM exhibió una morfología tipo esférica con un tamaño de partícula promedio de 85.4 nm (Figura 7b). Los grupos funcionales en el análisis de FT-IR indicaron la presencia típica de la banda en 510 cm^{-1} relacionado con la vibración de estiramiento de enlaces Zn-O en óxidos metálicos, asimismo, las principales regiones infrarrojas de la MD se encuentran por debajo de 1000 cm^{-1} lo que caracteriza las vibraciones de estiramiento del anhidroglucosa (Figura 7c).

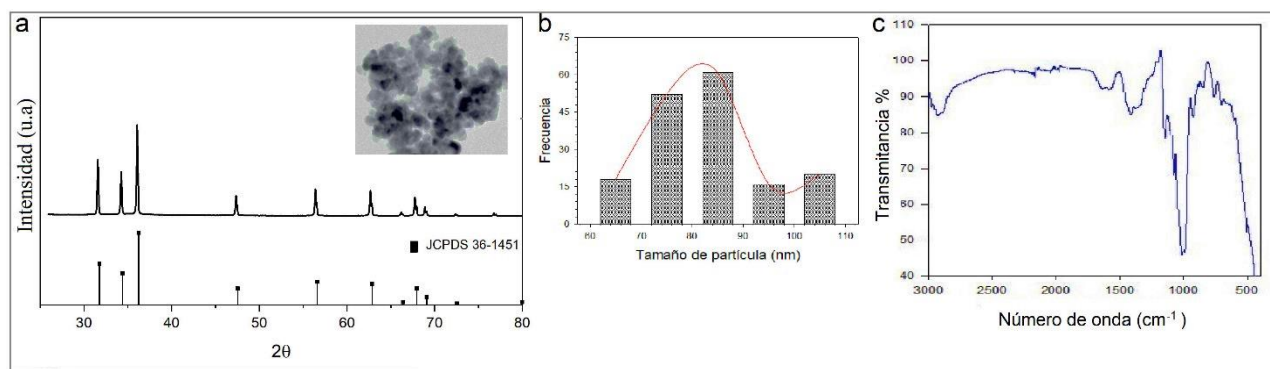


Figura 7. Patrones DRX (a), micrografías e histogramas de distribución de tamaño de partícula (b) y FT-IR de las NPs-ZnO y MD (c).

4.2 Efecto de las NPS-ZnO modificadas con MD en el crecimiento y desarrollo de la planta de cempasúchil

La altura, diámetro de tallo, longitud de la raíz, biomasa fresca total y biomasa seca total de las plantas de cempasúchil fueron afectados significativamente por la concentración de las nZnO modificadas con MD. Las formas de aplicación (foliar y drench) de las NPs-ZnO modificadas con MD afectaron significativamente todas las variables evaluadas (Tabla 1).

La altura de la planta mejoró cuando se aplicaron NPs-ZnO modificadas con MD tanto a 100 mg L^{-1} y 500 mg L^{-1} representando un incremento del 52.43% y 50.40%,

respectivamente, esto comparado con el control (Tabla 1). El diámetro de tallo registró un incremento 56.42% con la aplicación de 500 mg L⁻¹ respecto al control. El parámetro de longitud de raíz aumentó 25.89% y 33.55% a 100 mg L⁻¹ y 500 mg L⁻¹, respectivamente; asimismo, la biomasa seca total mostró un comportamiento similar en las mismas concentraciones, con incrementos que representaron 37.26% y 40.78% (Tabla 1). La biomasa fresca total incrementó con la concentración de NPs-ZnO modificadas con MD más elevada (1000 mg L⁻¹) aumentando un 49% respecto a plantas control (Tabla 1). La forma de aplicación foliar mostró incremento en la altura de la planta, asimismo se observó que en el diámetro de tallo la forma de aplicación no influyó significativamente, sin embargo, se logró observar un sutil incremento con la aplicación foliar (Tabla 1). La longitud de raíz y ambos pesos (fresco y seco total) la mejor forma de aplicación que incrementó los valores de los parámetros fue la aplicación al drench (Tabla 1). Respecto a la interacción de la concentración*modo de aplicación (C*MA) influyó significativamente en todas las variables evaluadas (Tabla 1).

Tabla1. Efecto de diferentes concentraciones de NPs-ZnO modificadas con MD y dos formas de aplicación sobre el crecimiento y desarrollo del cultivo de cempasúchil.

	Altura de planta (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Longitud de raíz (cm)	BFT (g)	BST (g)
Concentración (mg L⁻¹)					
Control	26.13 d	7.32 d	16.72 bc	149.48 d	29.25 c
100	39.83 a	10.28 b	21.05 a	206.40 b	40.15 a
250	37.17 bc	8.98 c	15.45 c	206.40 b	34.70 b
500	39.30 ab	11.45 a	22.33 a	194.48 c	41.18 a
1000	36.50 c	10.00 b	18.47 b	222.83 a	38.45 ab
ANOVA	<i>p</i> ≤.0001	<i>p</i> ≤.0001	<i>p</i> ≤.0001	<i>p</i> ≤.0001	<i>p</i> ≤.0001
Forma de aplicación					
Foliar	36.57 a	9.66 a	16.83 b	185.23 b	33.09 b
Drench	35.00 b	9.55 a	20.77 a	213.70 a	40.40 a
ANOVA	<i>p</i> ≤0.0092	<i>p</i> ≤0.5712	<i>p</i> ≤.0001	<i>p</i> ≤.0001	<i>p</i> ≤.0001
Interacción					
C*MA	<i>p</i> ≤.0001	<i>p</i> ≤0.0025	<i>p</i> ≤.0001	<i>p</i> ≤.0001	<i>p</i> ≤.0001

BFT=biomasa fresca total, BST=biomasa seca total. Letras diferentes dentro de la misma columna indican diferencias estadísticas según la prueba de comparaciones múltiples de Tukey (*p*≤ 0.05).

4.3 Efecto de las NPS-ZnO modificadas con MD en la calidad de la inflorescencia y parámetros fotosintéticos

El parámetro de altura de inflorescencia (altura de domo) mostró un incremento del 21.7% con la aplicación de 1000 mg L⁻¹, sin embargo, a concentraciones menores de 100 mg L⁻¹ y 500 mg L⁻¹ de NPs-ZnO modificadas con MD también se registró incremento de 14.2% y 14.9%, respectivamente, comparado con el control (Tabla 2). La aplicación de 100 mg L⁻¹ y 250 mg L⁻¹ incrementaron 1.8 veces más la inflorescencia o número de flores por planta comparado con el control que registró 4.67 inflorescencias por planta (Tabla 2). El diámetro o tamaño de la inflorescencia mejoró significativamente con la aplicación tanto de 500 mg L⁻¹ como con 1000 mg L⁻¹ representando 30.8% y 29.7% comparados con el testigo. Las unidades SPAD incrementaron 33.2% a 1000 mg L⁻¹ comparado con el testigo, no obstante, las concentraciones de 100 mg L⁻¹ y 250 mg L⁻¹ también mejoraron este parámetro. Respecto a la tasa fotosintética mejoró 43.4% con aplicación de 250 mg L⁻¹ de NPs-ZnO modificadas con MD, asimismo, la concentración de 100 mg L⁻¹ logra incrementar 39.1% la tasa fotosintética, comparado con el control (Tabla 2). La forma de aplicación no fue significativa en el parámetro de la altura de la inflorescencia (Tabla 2), caso contrario a las variables de inflorescencias por planta y tasa fotosintética, donde la forma de aplicación al drench mejoró ambas variables. Respecto al diámetro de la inflorescencia y las unidades SPAD ambas mostraron efecto significativo al aplicar las NPs-ZnO modificadas con MD cuando se aplicó vía foliar (Tabla 2). En relación a la interacción de la C*MA influyó significativamente en todas las variables de calidad de inflorescencia, unidades SPAD y tasa fotosintética de plantas de cempasúchil (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto de diferentes concentraciones de NPs-ZnO modificadas con MD y dos formas de aplicación sobre la calidad de inflorescencia, unidades SPAD y tasa fotosintética de plantas de cempasúchil.

	Altura de inflorescencia (mm)	Inflorescencias por planta	Diámetro de inflorescencia (mm)	Unidades SPAD	Tasa fotosintética ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Concentración (mg L⁻¹)					
Control	43.22 c	4.67 c	63.25 c	45.17 c	9.37 bc
100	49.40 ab	7.17 ab	78.51 b	58.25 a	13.04 a
250	48.72 b	8.83 a	78.83 b	59.17 a	13.44 a
500	49.67 ab	6.67 b	82.77 a	53.88 b	11.53 b
1000	52.63 a	8.5 a	82.06 a	60.18 a	8.79 c
ANOVA	$p \leq .0001$	$p \leq .0001$	$p \leq .0001$	$p \leq .0001$	$p \leq .0001$
Forma de aplicación					
Foliar	49.41 a	6.53 b	79.17 a	58.21 a	10.31 b
Drench	48.045 a	7.80 a	74.99 b	52.45 b	12.15 a
ANOVA	0.0946	$p \leq 0.0019$	$p \leq .0001$	$p \leq .0001$	0.0008
Interacción					
C*MA	$p \leq 0.0099$	$p \leq 0.0002$	$p \leq 0.0002$	$p \leq .0001$	$p \leq .0001$

Letras diferentes dentro de la misma columna indican diferencias estadísticas según la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p \leq 0.05$).

4.4 Efecto de la concentración y la forma de aplicación de las NPS-ZnO modificadas con MD sobre los parámetros de crecimiento, calidad y tasa fotosintética

Respecto a la interacción de las concentraciones y la forma de aplicación de las NPs-ZnO modificadas con MD, se observó que la altura de la planta incrementó con aplicación de 500 mg L⁻¹ siempre y cuando se administrara vía foliar (Figura 8a). El diámetro de tallo mejoró incrementó cuando se aplicaron 100 mg L⁻¹ y 500 mg L⁻¹ de NPs-ZnO con aplicación foliar, sin embargo, se observó que a concentración de 500 mg L⁻¹ de NPs-ZnO aplicadas al drench también incrementa este parámetro (Figura 8b). Las variables de longitud de raíz (Figura 8c) y biomasa seca total (Figura 8e), respectivamente) mejoraron significativamente en las concentraciones de 100 mg L⁻¹ y 500 mg L⁻¹ con aplicación al drench comparados con el control. La biomasa fresca total aumentó significativamente con aplicaciones de 100 mg L⁻¹, 250 mg L⁻¹ y 1000 mg L⁻¹ (Figura 8d).

Nuestros resultados son similares a los obtenidos en *Capsicum chinense* donde se evaluó el impacto de diferentes concentraciones entre 100 mg L⁻¹ y 500 mg L⁻¹ de NPs-ZnO en el crecimiento de plantas, los resultados indicaron mejoras significativas en la altura de la planta, diámetro del tallo y biomasa fresca y seca (Israel García-López et al., 2018). Asimismo, en el cultivo de arroz los resultados demostraron que la aplicación de NPs-ZnO incrementó la producción de granos, la acumulación de materia seca y el contenido de Zn en los granos en comparación con el tratamiento control (Zhang et al., 2021). La aplicación de NPs-ZnO en *Lactuca sativa* L. en maceta reportó que a una dosis de 10 mg kg⁻¹, se mejoró la biomasa y el contenido de Zn en el tejido vegetal (Xu et al., 2018). Las NPs-ZnO han sido identificadas como promotoras del crecimiento vegetal, ya que no solo incrementan la tasa de germinación de las semillas, sino que también estimulan el desarrollo de la radícula, favoreciendo la acumulación de biomasa en las plantas (Tymoszuik et al., 2022). Este efecto beneficioso se atribuye en gran medida a la función esencial del zinc como micronutriente, el cual participa activamente en diversos procesos fisiológicos de las plantas. En particular, el Zn está involucrado en la regulación de fitohormonas como las auxinas, facilitando la síntesis de triptófano, un precursor clave en la biosíntesis de estas hormonas. Además, su papel como cofactor en importantes enzimas redox, como la superóxido dismutasa y diversas deshidrogenasas, contribuye a la mitigación del estrés oxidativo y al mantenimiento del metabolismo celular (Marschner, 2011).

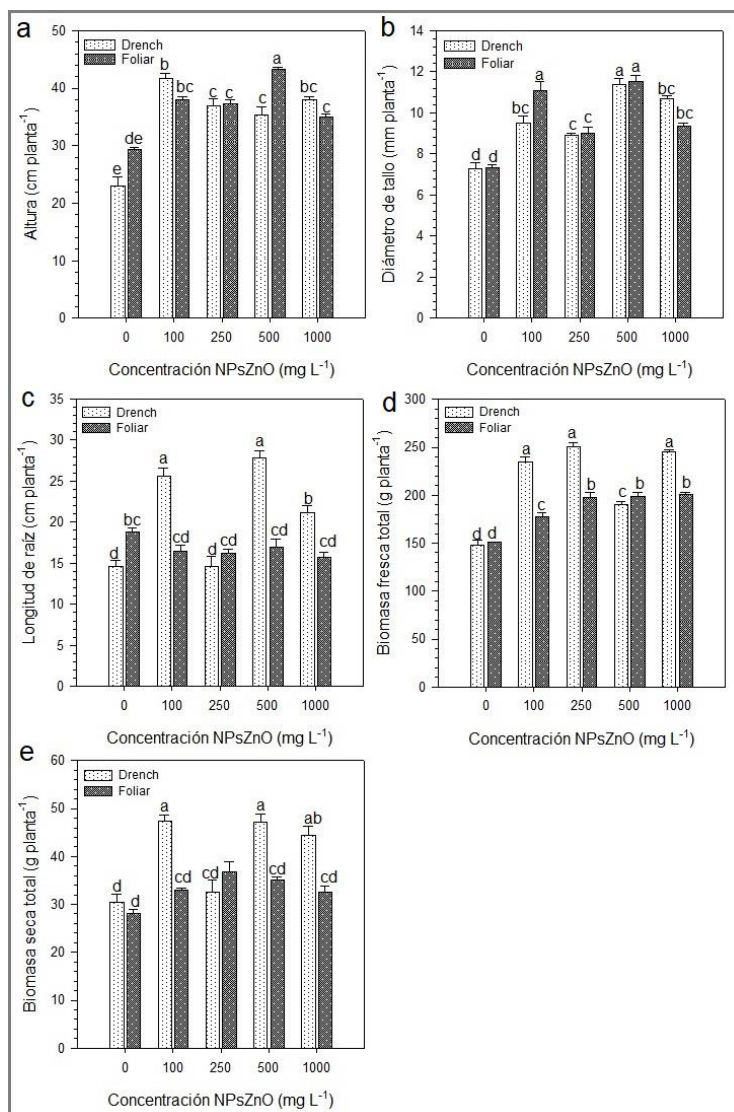


Figura 8. Efecto de la aplicación de ZnO-NPs modificadas con MD en la altura de la planta (a), diámetro del tallo (b), longitud de la raíz (c), BFT (d) y BST (e) de plantas de campesúchil. Las barras representan el error estándar de la media. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0.05$).

La altura de la inflorescencia mostró mejora en todas las concentraciones y las dos formas de aplicación (Figura 9a) comparado con el control. El número de inflorescencias por planta incrementó con la concentración de 1000 mg L⁻¹ en aplicación al drench (Figura 9b). En cuanto al tamaño de la inflorescencia, el diámetro de ésta incrementó significativamente con aplicación foliar de NPs-ZnO a 500 mg L⁻¹ (Figura 9c). Las unidades SPAD incrementaron con aplicación foliar tanto de 250 mg L⁻¹ como 1000 mg L⁻¹ (Figura 9d). Finalmente, la tasa fotosintética incremento significativamente con la aplicación al drench de NPs-ZnO a concentración de 500 mg L⁻¹.

Cabe señalar que los estudios relacionados con la aplicación de NPs-ZnO en ornamentales son limitados. En el ámbito de la floricultura, la nanotecnología enfoca los estudios en gran medida a la vida poscosecha de las plantas ornamentales que representan un desafío crítico que reducen la longevidad y calidad de las ornamentales (Kapoor et al., 2024). Así pues, las NPs, gracias a sus propiedades antibacterianas y antifúngicas, han demostrado ser una alternativa prometedora para el manejo poscosecha (Salachna et al., 2019).

Dentro de las escasas investigaciones enfocadas en las plantas ornamentales, podemos encontrar estudios similares a los nuestros, por ejemplo, el estudio realizado en el crecimiento y la floración de lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) donde la pulverización foliar de NPs-ZnO a tan solo 6 mg L⁻¹ aumentó el número de hojas y ramas laterales, el contenido de clorofila de las hojas, el contenido de antocianina de los pétalos y aumentó el número de flores (Seydmohammadi et al., 2020). Otro estudio reveló incremento del diámetro y peso de la cabeza de girasol con la aplicación de NPs-ZnO comparado con plantas no expuestas (Kolenčik et al., 2020).

Los resultados obtenidos se atribuyen a la esencialidad del Zn, dada su participación en múltiples procesos fisiológicos fundamentales. Su presencia favorece la síntesis de proteínas, optimiza la eficiencia del proceso fotosintético y promueve el desarrollo de los cloroplastos, estructuras clave para la producción de energía en la planta; además, el Zn desempeña un papel determinante en la división celular, contribuyendo al crecimiento y regeneración de los tejidos vegetales (Sarwar et al., 2013).

Respecto al intercambio gaseoso se sugiere que el efecto de las NPs-ZnO en la mejora del intercambio gaseoso está vinculado con el incremento en la actividad de la anhidrasa carbónica y la síntesis de pigmentos fotosintéticos (Ali et al., 2021). Estudios realizados en otros cultivos reportan mejora en el intercambio gaseoso foliar de plantas de papa, donde se incrementó la concentración de pigmentos fotosintéticos y el índice SPAD (Al-Selwey et al., 2023). En *Oryza sativa* el suministro de NPs-ZnO aplicadas en pulverización foliar tuvo efectos positivos en los parámetros relacionados con la fotosíntesis, el valor SPAD (40%) y la estructura del cloroplasto (Faizan et al., 2021).

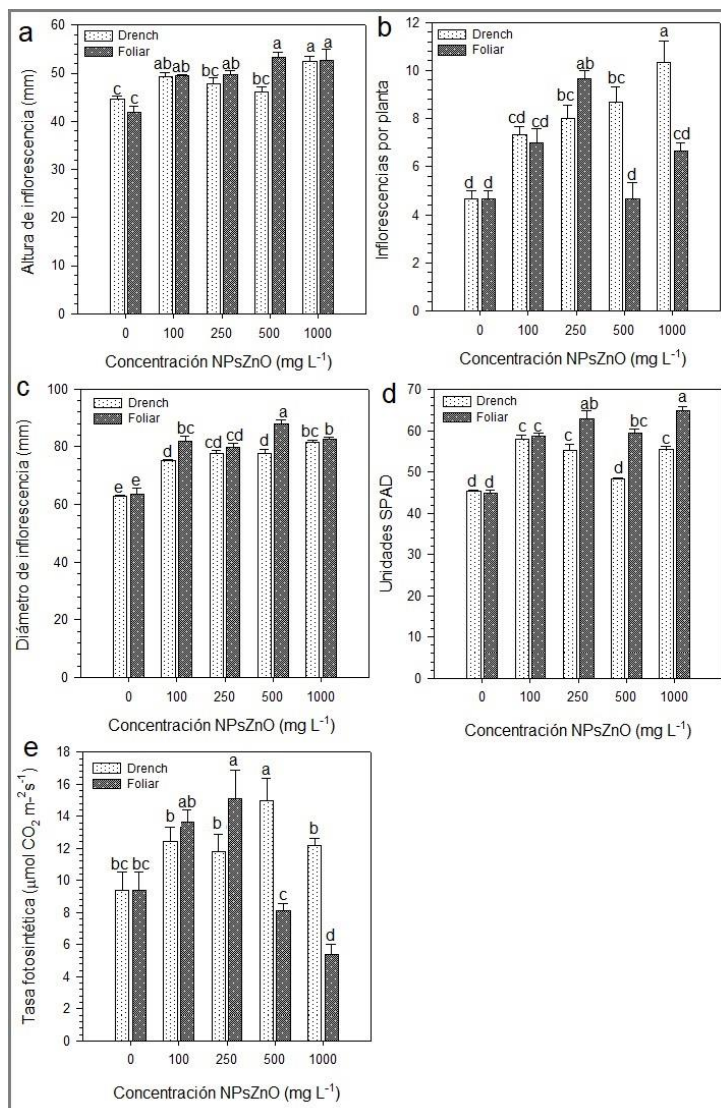


Figura 9. Efecto de la aplicación de ZnO-NPs modificadas con MD en la altura de inflorescencia (a), número de inflorescencias por planta (b), diámetro de la inflorescencia (c), unidades SPAD (d) y tasa fotosintética (e) de la inflorescencia de plantas de cempasúchil. Las barras representan el error estándar de la media. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0.05$).

V. Conclusión

La aplicación de la nanotecnología en la agricultura ha mostrado avances significativos en la mejora de la calidad y productividad de diversos cultivos. Sin embargo, en el ámbito de las plantas ornamentales, la investigación es aún incipiente y se concentra principalmente en aspectos poscosecha, como la prolongación de la vida útil de las flores cortadas. Estudios recientes han evidenciado que las nanopartículas poseen propiedades antibacterianas que contribuyen a reducir el crecimiento microbiano en los

vasos del xilema, disminuyendo así la obstrucción vascular y retrasando procesos de senescencia y abscisión de pétalos. Esto se traduce en una mayor longevidad y calidad estética de las flores durante su comercialización.

A pesar de estos hallazgos, existe una notable carencia de investigaciones que aborden el impacto de la nanotecnología en etapas anteriores al corte, específicamente en el crecimiento, desarrollo y calidad intrínseca de las plantas ornamentales. La mayoría de los estudios se centran en cultivos alimentarios, donde se ha demostrado que la aplicación de nanopartículas puede mejorar la absorción de nutrientes, incrementar la resistencia al estrés biótico y abiótico, y potenciar la eficiencia fotosintética. Estas mejoras sugieren que la nanotecnología podría desempeñar un papel crucial en la optimización de características ornamentales, como la intensidad y duración del color floral, la robustez del tallo y la uniformidad del follaje.

Es imperativo que futuras investigaciones se orienten hacia la evaluación de los efectos de diferentes tipos y concentraciones de nanopartículas en especies ornamentales, considerando variables como la morfología de la planta, la composición del suelo y las condiciones ambientales. Además, es esencial investigar los posibles efectos secundarios o fitotóxicos que podrían derivarse de la aplicación de nanopartículas, asegurando así la seguridad y sostenibilidad de estas prácticas.

La integración de la nanotecnología en la horticultura ornamental no solo tiene el potencial de mejorar la calidad y atractivo de las plantas, sino que también puede contribuir a prácticas más sostenibles. Por ejemplo, el uso de nanofertilizantes y nanopesticidas podría reducir la cantidad de insumos químicos necesarios, minimizando el impacto ambiental y promoviendo una producción más ecológica.

Aunque la aplicación de la nanotecnología en la floricultura ha mostrado resultados prometedores en la extensión de la vida poscosecha, es fundamental ampliar el espectro de investigación para comprender plenamente su potencial en la mejora de la calidad y desarrollo de las plantas ornamentales desde etapas tempranas. Una comprensión más profunda y una aplicación estratégica de la nanotecnología podrían revolucionar la

industria ornamental, ofreciendo productos de mayor calidad y contribuyendo a la sostenibilidad del sector.

VI. Literatura revisada

- Abdussalam-Mohammed, W. (2019). Review of Therapeutic Applications of Nanotechnology in Medicine Field and its Side Effects. In *Journal of Chemical Reviews* (Vol. 1, Issue 3, pp. 243–251). Sami Publishing Company. <https://doi.org/10.33945/SAMI/JCR.2019.3.5>
- Ali, E. A., M.T. Said, M.A. Sayed, & M.R. Sonosy. (2021). Impact of Foliar Spray by Zinc Oxide Nanoparticles on Peanut Pro-duction Under New Valley Conditions. *Assiut Journal of Agricultural Sciences*, 51(4), 16–31. <https://doi.org/10.21608/ajas.2021.147392>
- Al-Selwey, W. A., Alsadon, A. A., Ibrahim, A. A., Labis, J. P., & Seleiman, M. F. (2023). Effects of Zinc Oxide and Silicon Dioxide Nanoparticles on Physiological, Yield, and Water Use Efficiency Traits of Potato Grown under Water Deficit. *Plants*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/plants12010218>
- Angélica Del Villar-Martínez, A., Ángel Serrato-Cruz, M., Solano-Navarro, A., Lucía Arenas-Ocampo, M., Guillermo Quintero-Gutiérrez, A., Luis Sánchez-Millán, J., Evangelista-Lozano, S., Jiménez-Aparicio, A., Alfredo García-Jiménez, F., & Emilio Vanegas-Espinoza, P. (2007). Fax (735) 394 1856. 2 Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carr. In *Artículo de Revisión Rev. Fitotec. Mex* (Vol. 30, Issue 2).
- Baker, S., Volova, T., Prudnikova, S. V., Satish, S., & Prasad M.N., N. (2017). Nanoagroparticles emerging trends and future prospect in modern agriculture system. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 53, 10–17. <https://doi.org/10.1016/J.ETAP.2017.04.012>
- Barajas-Rodríguez, M., Soto-Nuñez, N. I., Escudero-Barrenechea, A., Sánchez-Galván, F., Hernández-Santiago, Q., & Bautista-Santos, H. (2021). Análisis de la cadena de suministro de la flor de cempasúchil (*Tagetes erecta* L.); caso de estudio. *Agro Productividad*, 13(3). <https://doi.org/10.32854/agrop.v13i3.1847>

- Boxi, S. S., Mukherjee, K., & Paria, S. (2016). Ag doped hollow TiO₂ nanoparticles as an effective green fungicide against *Fusarium solani* and *Venturia inaequalis* phytopathogens. *Nanotechnology*, 27(8). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/8/085103>
- Clapp, J. (2021). Explaining Growing Glyphosate Use: The Political Economy of Herbicide-Dependent Agriculture. *Global Environmental Change*, 67, 102239. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102239>
- Cruz-Luna, A. R., Cruz-Martínez, H., Vásquez-López, A., & Medina, D. I. (2021). Metal Nanoparticles as Novel Antifungal Agents for Sustainable Agriculture: Current Advances and Future Directions. *Journal of Fungi*, 7(12), 1033. <https://doi.org/10.3390/jof7121033>
- Delfani, M., Baradarn Firouzabadi, M., Farrokhi, N., & Makarian, H. (2014). Some Physiological Responses of Black-Eyed Pea to Iron and Magnesium Nanofertilizers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(4), 530–540. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.863911>
- Dhoke, S. K., Mahajan, P., & Khanna, A. S. (2011). Effect of nano-ZnO particle suspension on growth of mung (*Vigna radiata*) and gram (*Cicer arietinum*) seedlings using plant agar method. *Journal of Nanotechnology*. <https://doi.org/10.1155/2011/696535>
- Dubey, A., & Mailapalli, D. R. (2016). *Nanofertilisers, Nanopesticides, Nanosensors of Pest and Nanotoxicity in Agriculture* (pp. 307–330). https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_7
- Dubrovsky, N. M., & Hamilton, P. A. (2010). *Nutrients in the nation's streams and groundwater: National findings and implications*. <https://doi.org/10.3133/fs20103078>
- Eichert, T., Kurtz, A., Steiner, U., & Goldbach, H. E. (2008). Size exclusion limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles. *Physiologia Plantarum*, 134(1), 151–160. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01135.x>

- Ekpa Effiong, D., Uwah, T. O., Udofa Jumbo, E., & Akpabio, A. E. (2020). Nanotechnology in Cosmetics: Basics, Current Trends and Safety Concerns-A Review. *Advances in Nanoparticles*, 9, 1–22. <https://doi.org/10.4236/anp.2020.91001>
- Faizan, M., Bhat, J. A., Hessini, K., Yu, F., & Ahmad, P. (2021). Zinc oxide nanoparticles alleviates the adverse effects of cadmium stress on *Oryza sativa* via modulation of the photosynthesis and antioxidant defense system. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 220, 112401. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2021.112401>
- Gómez López, A. (2017). Nanomedicina y su impacto en la práctica médica. *Repertorio de Medicina y Cirugía*, 26(3), 129–130. <https://doi.org/10.1016/j.reper.2017.06.003>
- Grillo, R., Pereira, A. E. S., Nishisaka, C. S., De Lima, R., Oehlke, K., Greiner, R., & Fraceto, L. F. (2014). Chitosan/tripolyphosphate nanoparticles loaded with paraquat herbicide: An environmentally safer alternative for weed control. *Journal of Hazardous Materials*, 278, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.05.079>
- Hooks, C. R. R., Wang, K. H., Ploeg, A., & McSorley, R. (2010). Using marigold (*Tagetes* spp.) as a cover crop to protect crops from plant-parasitic nematodes. *Applied Soil Ecology*, 46(3), 307–320. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2010.09.005>
- Hulla, J., Sahu, S., & Hayes, A. (2015). Nanotechnology. *Human & Experimental Toxicology*, 34(12), 1318–1321. <https://doi.org/10.1177/0960327115603588>
- Jalali, M., Ghanati, F., Modarres-Sanavi, A. M., & Khoshgoftarmanesh, A. H. (2017). Physiological effects of repeated foliar application of magnetite nanoparticles on maize plants. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203(6), 593–602. <https://doi.org/10.1111/jac.12208>
- Kairyte, K., Kadys, A., & Luksiene, Z. (2013). Antibacterial and antifungal activity of photoactivated ZnO nanoparticles in suspension. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 128, 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2013.07.017>
- Kapoor, P., Gupta, H., Vasishta, N., Thakur, D., Priti, & Bhargava, B. (2024). Nanotechnology in Ornamentals: Current Trends and Future Aspects. In *Ornamental Horticulture: Latest*

Cultivation Practices and Breeding Technologies (pp. 319–333). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4028-4_17

Kolenčík, M., Ernst, D., Urík, M., Ďurišová, L., Bujdoš, M., Šebesta, M., Dobročka, E., Kšiňan, S., Illa, R., Qian, Y., Feng, H., Černý, I., Holíšová, V., & Kratošová, G. (2020). Foliar Application of Low Concentrations of Titanium Dioxide and Zinc Oxide Nanoparticles to the Common Sunflower under Field Conditions. *Nanomaterials*, 10(8), 1619. <https://doi.org/10.3390/nano10081619>

Krishna, S. B. N., & Golla, N. (2023). Nanofungicides: A new frontier in agriculture. *Nanofungicides: Novel Applications in Plant Disease Control*, 123–137. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95305-4.00007-8>

Laosinwattana, C., Wichittrakarn, P., & Teerarak, M. (2018). Chemical composition and herbicidal action of essential oil from *Tagetes erecta* L. leaves. *Industrial Crops and Products*, 126, 129–134. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2018.10.013>

Lin, D., & Xing, B. (2008). Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles. *Environmental Science and Technology*, 42(15), 5580–5585. <https://doi.org/10.1021/es800422x>

Liu, & Lal, R. (2014). Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*). *Scientific Reports*, 4. <https://doi.org/10.1038/srep05686>

Liu, R., & Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. In *Science of the Total Environment* (Vol. 514, pp. 131–139). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.104>

López Estrada, D., Chang, W.-T., & Heinrich, M. (2024). From “traditional” to modern medicine: A medical and historical analysis of *Tagetes erecta* L. (*Cempasúchil*). *Journal of Traditional and Complementary Medicine*. <https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2024.08.001>

Maldonado-Bonilla, L. D., Hernández-Guzmán, G., Martínez-Gallardo, N. A., Hernández-Flores, J. L., Délano-Frier, J. P., & Valenzuela-Soto, J. H. (2021). Strain of *Pseudomonas syringae* causes bacterial leaf spot in marigold plants (*Tagetes erecta*) in Mexico. *Revista*

Mexicana de Fitopatología, Mexican Journal of Phytopathology, 39(3).
<https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2104-5>

Matras, E., Gorczyca, A., Przemieniecki, S. W., & Oćwieja, M. (2022). Surface properties-dependent antifungal activity of silver nanoparticles. *Scientific Reports*, 12(1), 18046.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-22659-2>

Mohammad, Z. H., Ahmad, F., Ibrahim, S. A., & Zaidi, S. (2022). Application of nanotechnology in different aspects of the food industry. *Discover Food*, 2(1), 12.
<https://doi.org/10.1007/s44187-022-00013-9>

Mohammed, K. P., Aarey, A., Tamkeen, S., & Jahan, P. (2015). Forskolin: Genotoxicity assessment in *Allium cepa*. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 777(1), 29–32. <https://doi.org/10.1016/J.MRGENTOX.2014.11.005>

Mushtaq, Z., & Faizan, S. (2021). Application of Nanosensors in Agriculture and Food Processing. In *Nanobiosensors for Agricultural, Medical and Environmental Applications* (pp. 175–186). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8346-9_9

Nasrollahzadeh, M., Sajadi, S. M., Sajjadi, M., & Issaabadi, Z. (2019). Applications of Nanotechnology in Daily Life. *Interface Science and Technology*, 28, 113–143.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813586-0.00004-3>

Nekrasova, G. F., Ushakova, O. S., Ermakov, A. E., Uimin, M. A., & Byzov, I. V. (2011). Effects of copper(II) ions and copper oxide nanoparticles on *Elodea densa* Planch. *Russian Journal of Ecology*, 42(6), 458–463. <https://doi.org/10.1134/S1067413611060117>

Nuruzzaman, M., Rahman, M. M., Liu, Y., & Naidu, R. (2016). Nanoencapsulation, Nano-guard for Pesticides: A New Window for Safe Application. In *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (Vol. 64, Issue 7, pp. 1447–1483). American Chemical Society.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05214>

Nuzhatun Nisa, T. A. (2015). Therapeutic and Diagnostic Applications of Nanotechnology in Dermatology and Cosmetics. *Journal of Nanomedicine & Biotherapeutic Discovery*, 05(03). <https://doi.org/10.4172/2155-983X.1000134>

- Pájaro Castro, N., Olivero Verbel, J., & Redondo Padilla, J. (2013). Nanotecnología aplicada a la medicina. *Revista Guillermo de Ockham*, 11(1), 125. <https://doi.org/10.21500/22563202.606>
- Pereira, A. E. S., Grillo, R., Mello, N. F. S., Rosa, A. H., & Fraceto, L. F. (2014). Application of poly(epsilon-caprolactone) nanoparticles containing atrazine herbicide as an alternative technique to control weeds and reduce damage to the environment. *Journal of Hazardous Materials*, 268, 207–215. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2014.01.025>
- Pérez Velasco, E. A., Galindo, R. B., Valdez Aguilar, L. A., González Fuentes, J. A., Puente Urbina, B. A., Lozano Morales, S. A., & Valdés, S. S. (2020). Effects of the morphology, surface modification and application methods of ZnO-NPs on the growth and biomass of tomato plants. *Molecules*, 25(6). <https://doi.org/10.3390/molecules25061282>
- Pérez-Velasco, E. A., Valdez-Aguilar, L. A., Betancourt-Galindo, R., Martínez-Juárez, J., Lozano-Morales, S. A., & González-Fuentes, J. A. (2021). Gas Exchange Parameters, Fruit Yield, Quality, and Nutrient Status in Tomato Are Stimulated by ZnO Nanoparticles of Modified Surface and Morphology and Their Application Form. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(2), 991–1003. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00416-0>
- Plucinski, A., Lyu, Z., & Schmidt, B. V. K. J. (2021). Polysaccharide nanoparticles: from fabrication to applications. *Journal of Materials Chemistry B*, 9(35), 7030–7062. <https://doi.org/10.1039/D1TB00628B>
- Pradhan, S., Patra, P., Das, S., Chandra, S., Mitra, S., Dey, K. K., Akbar, S., Palit, P., & Goswami, A. (2013). Photochemical modulation of biosafe manganese nanoparticles on vigna radiata: A detailed molecular, biochemical, and biophysical study. *Environmental Science and Technology*, 47(22), 13122–13131. <https://doi.org/10.1021/es402659t>
- Raliya, R., & Tarafdar, J. C. (2013). ZnO Nanoparticle Biosynthesis and Its Effect on Phosphorous-Mobilizing Enzyme Secretion and Gum Contents in Clusterbean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). *Agricultural Research*, 2(1), 48–57. <https://doi.org/10.1007/s40003-012-0049-z>

- Rico, C. M., Majumdar, S., Duarte-Gardea, M., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2011). Interaction of Nanoparticles with Edible Plants and Their Possible Implications in the Food Chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(8), 3485–3498. <https://doi.org/10.1021/jf104517j>
- Rouhani, M., Samih, M. A., & Kalantari, S. (2013). *Insecticidal effect of silica and silver nanoparticles on the cowpea seed beetle, Callosobruchus maculatus F. (Col.: Bruchidae)*. www.SID.ir
- Salachna, P., Byczyńska, A., Zawadzińska, A., Piechocki, R., & Mizielińska, M. (2019). Stimulatory Effect of Silver Nanoparticles on the Growth and Flowering of Potted Oriental Lilies. *Agronomy*, 9(10), 610. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100610>
- Saldivar, L., Hugo, R., Argüello, M., los Santos Villarreal, D., & Reyes, V. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28(2), 9–24. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1575>
- Sangeetha, J., Thangadurai, D., Hospet, R., Purushotham, P., Karekalammanavar, G., Mundaragi, A. C., David, M., Shinge, M. R., Thimmappa, S. C., Prasad, R., & Harish, E. R. (2017). Agricultural nanotechnology: Concepts, benefits, and risks. *Nanotechnology: An Agricultural Paradigm*, 1–17. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4573-8_1
- Sarwar, M., Rehman, S., Ayyub, C. M., Ahmad, W., Shafi, J., & Shafique, K. (2013). Modeling Growth of Cut-Flower Stock (*Matthiola incana* R. Br.) in Response to Differing in nutrient Level. *Universal Journal of Food and Nutrition Science*, 1(1), 4–10. <https://doi.org/10.13189/ujfns.2013.010102>
- Serrato Cruz, M. Á. (2022). Prácticas de cultivo de la flor de muerto (*Tagetes erecta* L.) y móviles culturales. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 19(3). <https://doi.org/10.22231/asyd.v19i3.1339>
- Seydmohammadi, Z., Roein, Z., & Rezvanipour, S. (2020). Accelerating the growth and flowering of *Eustoma grandiflorum* by foliar application of nano-ZnO and nano-CaCO₃. *Plant Physiology Reports*, 25(1), 140–148. <https://doi.org/10.1007/s40502-019-00473-9>

- Shah, & Belozerova. (2009). Influence of Metal Nanoparticles on the Soil Microbial Community and Germination of Lettuce Seeds. *Water, Air, and Soil Pollution*, 197(1–4), 143–148. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9797-6>
- Shah, Pirzada, B. M., Price, G., Shibiru, A. L., & Qurashi, A. (2022). Applications of nanotechnology in smart textile industry: A critical review. In *Journal of Advanced Research* (Vol. 38, pp. 55–75). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.01.008>
- Shahid-ul-Islam, & Butola, B. S. (2019). Recent advances in chitosan polysaccharide and its derivatives in antimicrobial modification of textile materials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 121, 905–912. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.102>
- Simonian, A. L., Good, T. A., Wang, S.-S., & Wild, J. R. (2005). Nanoparticle-based optical biosensors for the direct detection of organophosphate chemical warfare agents and pesticides. *Analytica Chimica Acta*, 534(1), 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.06.056>
- Singh, A., Singh, N. B., Afzal, S., Singh, T., & Hussain, I. (2018). Zinc oxide nanoparticles: a review of their biological synthesis, antimicrobial activity, uptake, translocation and biotransformation in plants. *Journal of Materials Science*, 53(1), 185–201. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1544-1>
- Srilatha, B. (2011). Nanotechnology in agriculture. *Journal of Nanomedicine and Nanotechnology*, 2(7). <https://doi.org/10.4172/2157-7439.1000123>
- Stadler, T., Buteler, M., & Weaver, D. K. (2010). Novel use of nanostructured alumina as an insecticide. *Pest Management Science*, 66(6), 577–579. <https://doi.org/10.1002/ps.1915>
- Suriyaprabha, R., Karunakaran, G., Kavitha, K., Yuvakkumar, R., Rajendran, V., & Kannan, N. (2014). Application of silica nanoparticles in maize to enhance fungal resistance. *IET Nanobiotechnology*, 8(3), 133–137. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2013.0004>

Thiruvengadam, M., Rajakumar, G., & Chung, I.-M. (2018). Nanotechnology: current uses and future applications in the food industry. *3 Biotech*, 8(1), 74. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1104-7>

Wang, He, L., Xu, L., Liu, Z., Xiong, Y., Zhou, W., Yao, H., Wen, Y., Geng, X., & Wu, R. (2023). Intelligent analysis of carbendazim in agricultural products based on a ZSHPC/MWCNT/SPE portable nanosensor combined with machine learning methods. *Analytical Methods*, 15(5), 562–571. <https://doi.org/10.1039/D2AY01779B>

Yang, Z., McClements, D. J., Xu, Z., Meng, M., Li, C., Chen, L., Qiu, C., Long, J., & Jin, Z. (2022). Carbohydrate-based functional ingredients derived from starch: Current status and future prospects. *Food Hydrocolloids*, 131, 107729. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107729>

Yin, J., Su, X., Yan, S., & Shen, J. (2023). Multifunctional Nanoparticles and Nanopesticides in Agricultural Application. In *Nanomaterials* (Vol. 13, Issue 7). MDPI. <https://doi.org/10.3390/nano13071255>

Zdrojewicz, Z., Waracki, M., Bugaj, B., Pypno, D., & Cabala, K. (2015). Medical applications of nanotechnology Zastosowanie nanotechnologii w medycynie nanomedicine • nanotechnology • nanostructures • cancer treatment • nano-knife • nanotubes • immunoprophylaxis. *Postepy Hig Med Dosw (Online)*, 69, 69. www.phmd.pl

Zhao, L., Peralta-Videa, J. R., Rico, C. M., Hernandez-Viezcas, J. A., Sun, Y., Niu, G., Servin, A., Nunez, J. E., Duarte-Gardea, M., & Gardea-Torresdey, J. L. (2014). CeO₂ and ZnO nanoparticles change the nutritional qualities of cucumber (*Cucumis sativus*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(13), 2752–2759. <https://doi.org/10.1021/jf405476u>