

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Impacto de Nanopartículas de Calcio y Silicio en la Calidad de Flor de *Lilium*

Por:

SANDRA ANDREA JUÁREZ GÓMEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Impacto de Nanopartículas de Calcio y Silicio en la Calidad de Flor de *Lilium*

Por:

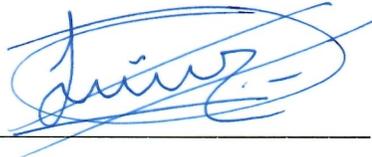
SANDRA ANDREA JUÁREZ GÓMEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



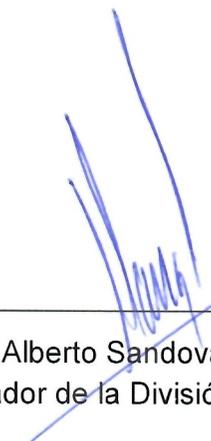
Dr. Antonio Juárez Maldonado
Asesor Principal



Dr. Fabián Pérez Labrada
Coasesor



Dr. Alonso Méndez López
Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2024

Derechos de Autor y Declaración de no plagio

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y 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, gráficas, 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 el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Autor principal


Sandra Andrea Juárez Gómez

Firma y Nombre

Asesor principal


Antonio Juárez Maldonado

Firma y Nombre

DEDICATORIA

A mis padres

José María Juárez Cervantes y Sandra Gómez Gutiérrez, quienes con su confianza, cariño y apoyo me alentaron a seguir adelante en esta meta. Por estar siempre a mi lado, por creer en mí y enseñarme a ser una persona de provecho. Por permitirme estar lejos de ustedes y siempre recibirme con amor. “El esfuerzo y las metas alcanzadas, reflejan la dedicación y el amor de los padres hacia sus hijos”.

A mis hermanos

Quienes me enseñaron a compartir, amar y perdonar. Por ser un gran pilar en mi vida. Por sus consejos y palabras de apoyo. Por nunca dejarme sola y hacerme saber que siempre contaré con ustedes al igual que ustedes conmigo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la grandiosa “Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro” que me brindó la oportunidad de conocer personas que han forjado parte de lo que soy y seré. Por darme cobijo en estos años y permitirme tener una gran calidad académica.

Al Dr. Antonio Juárez Maldonado por ser un gran guía y darme tan valiosos consejos. Por siempre transmitir amabilidad y confianza hacia mi persona. Por su dedicación e incentivación para la realización de esta tesis. Por motivarme a crecer como persona y enseñarme lo valioso que es ser un buen profesionalista. Por su visión crítica en muchos aspectos de la vida. Por su rectitud en su profesión como docente e investigador.

A la Dra. Yolanda González García por el apoyo que me ha dado siempre dentro y fuera de la universidad. Por brindarme su amistad y compartir conmigo sus conocimientos y experiencia en la investigación.

A la Dra. Aida Isabel Robles por su orientación y apoyó durante toda mi formación universitaria.

A los profesores que han sido parte de mi camino en esta grandiosa institución. A todos ellos les quiero agradecer por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí.

A las personas que han formado parte de mi vida quiero agradecer su amistad, amor, consejo, apoyo y compañía en los momentos más difíciles. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón. Sin importar donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí y por todo lo que me han brindado.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
ÍNDICE DE CUADROS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
RESUMEN	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	3
1.2 Objetivos específicos	3
1.3 Hipótesis.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Importancia de la floricultura en México y el mundo.....	4
2.2 Características de <i>Lilium</i>.....	5
2.2.1 Establecimiento del cultivo y requerimientos ambientales.....	6
2.2.2 Problemática en la poscosecha.....	6
2.3 Nanotecnología y nanomateriales.....	8
2.3.1 Nanotecnología en la agricultura	8
2.3.2 Bioestimulación con nanopartículas	9
2.3.3 Sistema de defensa antioxidante.....	11
2.4 Nanopartículas de silicio.....	12
2.5 Nanopartículas de calcio.....	13
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
3.1 Ubicación del experimento	15
3.2 Material vegetal	15
3.3 Desarrollo del cultivo.....	15

3.4	Características de las nanopartículas de calcio-silicio	16
3.5	Aplicación de tratamientos	17
3.6	Variables agronómicas (calidad de las flores)	17
3.7	Variables bioquímicas	18
3.7.1	Clorofilas	18
3.7.2	Vitamina C.....	18
3.7.3	Fenoles.....	19
3.7.4	Flavonoides	19
3.7.5	Capacidad antioxidante (DPPH).....	19
3.7.6	Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂)	20
3.7.7	Malondialdehido (MDA)	20
3.8	Análisis estadísticos	21
4.	RESULTADOS	22
4.1	Variables agronómicas (calidad de flor)	22
4.2	Variables bioquímicas	24
5.	DISCUSIÓN	30
6.	CONCLUSIÓN	34
7.	LITERATURA CITADA	35

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos y concentraciones de nanopartículas de calcio-silicio (1 y 2).....	17
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Difractogramas XRD (A) y termogramas TGA (B) de nanopartículas de CaSi-1 y CaSi-2.....	16
Figura 2. Distribución de tratamientos en el área de estudio.....	21
Figura 3. Efecto de las nanopartículas de calcio-silicio en la calidad de flores de <i>Lilium</i>	22
Figura 4. Efecto de las nanopartículas de calcio-silicio sobre el contenido de clorofila y la relación de clorofila <i>a/b</i> en flores de <i>Lilium</i>	24
Figura 5. Efecto de las nanopartículas de calcio-silicio sobre clorofila el contenido de clorofila y la relación de clorofila <i>a/b</i> en hojas de <i>Lilium</i>	25
Figura 6. Efecto de las nanopartículas de calcio-silicio sobre el contenido de antioxidantes y capacidad antioxidante en flores de <i>Lilium</i>	26
Figura 7. Contenido de antioxidantes y capacidad antioxidante en hojas de <i>Lilium</i> bajo el efecto de las nanopartículas de calcio-silicio.....	27
Figura 8. Efecto de las nanopartículas de calcio-silicio sobre el contenido de peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) y malondialdehído (MDA) en hojas.....	28

RESUMEN

Dentro de la floricultura el género *Lilium* es de gran valor económico, ya que tiene una gran diversidad de formas y colores. Sin embargo, la calidad de sus flores deriva principalmente de su aspecto visual y su vida útil, siendo este uno de los retos más importantes para la industria. Debido a esto, se deben utilizar alternativas que permitan contrarrestar los efectos nocivos de la senescencia en la calidad poscosecha de las flores. La nanotecnología en la agricultura es una herramienta novedosa, que proporciona beneficios en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Dentro de esta se encuentran diversos materiales de tamaño nanométrico que tienen una respuesta positiva, destacando la producción de antioxidantes que neutralizan los efectos negativos de las especies reactivas de oxígeno (ROS). El objetivo de este estudio fue determinar el impacto de la aplicación vía foliar de dos diferentes tipos de nanopartículas (NP) de calcio y silicio (CaSi-1, CaSi-2) a concentraciones de 500 y 750 mg L⁻¹ en plantas de *Lilium*. Las diferencias entre CaSi-1 (23.29 nm) y CaSi-2 (15.29 nm) fueron el tamaño y el porcentaje de residuos inorgánicos presentes en la síntesis CaSi-1 (62 %) y CaSi-2 (87 %). Para determinar el efecto de ambas NP en el desarrollo del cultivo y la calidad de sus flores, se evaluaron variables agronómicas y bioquímicas en flor y hoja. Los resultados mostraron efectos positivos sobre la calidad de las flores, incrementado la biomasa fresca y la longitud de flor cerrada. Además, se incrementó el contenido de clorofila a en hoja (20 %) y el contenido de vitamina C (84.7 %). En la flor se incrementó la vitamina C (40 %), flavonoides (24.7 %), capacidad antioxidante de compuestos hidrófilos (11-21 %) y lipófilos más de 10 %. En cuanto a los indicadores de estrés, CaSi-2 en su concentración más alta, incrementó el contenido H₂O₂ en flor (13.2-16.7 %) y MDA (29.8 %). Ambas nanopartículas de calcio-silicio generan impactos positivos en las plantas de *Lilium*, permitiendo una mejora en la calidad de sus flores.

Palabras clave: bioestimulación, floricultura, *Lilium orientalis*, nanotecnología, poscosecha, sistema de defensa antioxidante.

1. INTRODUCCIÓN

La familia Liliaceae es una de las más importantes dentro de los cultivos florícolas. El género *Lilium* comprende a nivel mundial el décimo lugar dentro de la floricultura, esto se debe a la gran variedad de formas y a la producción intensiva del cultivo durante todo el año (Flores-Pérez *et al.*, 2021). Según el Servicio de Información Agroalimentario y Pesquera (SIAP), la producción de *Lilium* en México corresponde al 2.8 % del total de flores de importancia comercial, alcanzando las 762,148 gruesas. Esto equivale a un total de 109, 749, 312 flores. Es importante destacar que una gruesa corresponde a 144 plantas de *Lilium*. Además, el Estado de México se destaca como el principal productor, abarcando el 84.5 % de la producción nacional de *Lilium* (SIAP, 2022).

Dentro del manejo de este cultivo se pueden encontrar diversas problemáticas, se sabe que en México existe un aumento en los costos de producción debido a que el material vegetal (bulbo) es importado, además de que este no está libre de patógenos y no cuenta con la certificación fitosanitaria adecuada (García-Velasco y Companioni-González, 2018). Por otra parte, la calidad poscosecha de los cultivos florícolas deriva principalmente de su aspecto visual, siendo este uno de los retos más importantes (Meir y Philosoph-Hadas, 2021). La senescencia y la mala calidad de las flores son las principales razones que condicionan la corta vida de florero (Sánchez-Navarro *et al.*, 2021). La marchitez temprana de los pétalos, cambio de color, aborto de botones florales y amarillamiento temprano de las hojas, provocan la pérdida del 10-30 % de la producción en *Lilium* (Kumari *et al.*, 2017). Además de que la longevidad de sus flores varía de entre cinco a catorce días dependiendo del manejo poscosecha (Sánchez-Alvear, 2005). Es por eso que es necesario el desarrollo de herramientas tecnológicas que permitan aumentar la calidad y vida útil de la flor (Cubría-Radío *et al.*, 2017).

La nanotecnología en la agricultura se utiliza como una herramienta novedosa que permite innovar y mejorar la producción de cultivos en todo el mundo (González-García *et al.*, 2021; Mukhopadhyay, 2014). Las nanopartículas (NP) se definen como partículas que varían de 1 a 100 nm, se pueden clasificar según su tamaño, forma y características químicas (Dasgupta *et al.*, 2017; Husen, 2020). Tienen muchas aplicaciones agrícolas como nanofertilizantes, nanopesticidas, nanobiosensores, bioestimulantes, entre otros. Su aplicación puede ayudar a mejorar el crecimiento de las plantas, causando cambios morfológicos y fisiológicos (Kamle *et al.*, 2020). Las NP en las plantas promueven el aumento de compuestos antioxidantes como mecanismo de defensa contra las especies reactivas de oxígeno (ROS), esto permite una mejora en las actividades fisiológicas de la planta y la tolerancia a diferentes tipos de estrés (Prasad, 2019).

El silicio (Si) es uno de los metaloides más abundantes de la corteza terrestre y se considera beneficioso para las plantas debido a su capacidad para fortalecer la pared celular (Fellet *et al.*, 2021). Según Cao *et al.* (2017) la aplicación de polietilenglicol (PEG) (0.1 %) con una adición de Si (1.2 mM) en plantas de tomate, reduce los niveles de ROS y mejora la estructura de la membrana plasmática reduciendo la fuga de solutos solubles. Además, la investigación de Rastogi *et al.* (2019) ha encontrado que la aplicación de nanopartículas de silicio tiene efectos positivos al mejorar el desarrollo y calidad de las plantas. Por otro lado, Avestan *et al.* (2019) encontraron que la aplicación de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂) en fresa bajo estrés salino suprimen los efectos negativos de la salinidad, disminuyendo la concentración de prolina. Por otra parte, el calcio es un macronutriente necesario para el funcionamiento adecuado de las plantas, es considerado un elemento esencial. Dentro de los cultivos ornamentales cumple una gran función, ya que ayuda a mejorar la vida útil de las flores fortaleciendo la pared celular, además de que actúa como segundo mensajero en diversas respuestas fisiológicas del estrés oxidativo (Thor, 2019; Mohammadbagheri y Naderi, 2017). Abd-El Ghany *et al.* (2021) indican que la aplicación de nanofosfato de calcio aumenta significativamente el peso seco, rendimiento y nutrientes en plantas de frijol.

1.1 Objetivo general

Determinar el impacto de dos tipos de nanopartículas de calcio-silicio sobre la calidad en el cultivo de *Lilium*.

1.2 Objetivos específicos

Determinar si la aplicación de nanopartículas de calcio-silicio mejoran la calidad y vida útil de las flores de *Lilium*.

Determinar qué concentraciones y tipos de nanopartículas de calcio-silicio son más eficientes para mejorar la calidad y vida útil de las flores de *Lilium*.

Analizar la respuesta del sistema de defensa antioxidante en las plantas de *Lilium*.

1.3 Hipótesis

Las nanopartículas de calcio-silicio prolongarán la vida de florero de *Lilium*, incrementando la actividad antioxidante que permitirá retardar la senescencia en la flor.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia de la floricultura en México y el mundo

La floricultura es un sector importante dentro de la horticultura que brinda sustento a grandes y pequeños productores, se encarga de cultivar y cortar flores ornamentales para dar estética y paisajismo (Datta, 2019). A nivel mundial más de 90 países están activos dentro de la floricultura, con un volumen de comercio que alcanza más de 130 millones de dólares por año (Meir y Philosoph-Hadas, 2021). Los principales exportadores son Holanda (Países Bajos), Colombia, Alemania, Bélgica, Italia, Ecuador y Kenia (Ramírez-Hernández *et al.*, 2017)

El origen de la floricultura en México tiene comienzo con la llegada de japoneses que se establecieron en el municipio de Villa Guerrero en el Estado de México, en los años de 1950-1960 (Nonato-Castillo *et al.*, 2018). Posteriormente su crecimiento fue impulsado por pequeños y grandes productores en los años de 1980-1990 con la plantación de 13,000 hectáreas (ha) de flor y el establecimiento de una empresa exportadora (Orozco-Hernández, 2007). En la actualidad los principales estados productores de flor en el país son 13, siendo el Estado de México el principal productor, seguido de Morelos, Puebla, Baja California, entre otros (SIAP, 2022). De acuerdo al Servicio de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON) para el año 2022 se sembraron 340.6 ha de *Lilium*, con una producción en el ciclo primavera-verano de 432,975.51 toneladas (t), con un valor de 149,059.40 (miles de pesos), y para el ciclo otoño-invierno se incrementó la producción a 450,286.42 t, con un valor de 209,008.45 (miles de pesos). Teniendo una producción anual de 883,261.93 t, con un valor de 358,065.85 (miles de pesos) (SIACON, 2022).

2.2 Características de *Lilium*

Las *Lilium* son monocotiledóneas que pertenecen a la familia de las Liliáceas, orden Liliales. Dentro de su género (*Lilium*) se reconocen más de 100 especies, destacando a nivel comercial, las azucenas, los híbridos asiáticos, orientales y trompeta (Francescangeli y Marinangeli, 2018). Son de origen tropical y subtropical, son plantas perennes que presentan un bulbo globoso (tallo modificado) que sirve de almacenamiento, el cual presenta un disco basal donde se insertan las hojas modificadas de reserva (escamas). Sus raíces salen por debajo del bulbo y juegan un papel muy importante en la absorción de nutrientes. Su tallo puede llegar a superar 1 m² de altura y tener numerosas hojas (20-150) que pueden estar separadas o juntas de manera alterna. Sus hojas son lanceoladas y pueden llegar a medir de 10-15 cm de largo y 2-3 cm ancho, no presentan peciolo y son de color verde oscuro. Cada planta presenta de 3-5 flores estas pueden ser erguidas o colgantes con forma de campana, trompeta, estrella, y turbante. Botánicamente hablando tiene 6 tépalos, 6 estambres y un gineceo. Los frutos son cápsulas con semillas que muestran un complejo patrón de germinación. Su reproducción puede ser vía sexual a través de semilla (pocamente empleado) o asexual a través de bulbos, bulbillos de la hoja o tallo, escamas del bulbo y por medio de tejido meristemático (Francescangeli y Marinangeli, 2018; Herreros, 1983).

Holanda es el principal productor y exportador de diversas variedades de *Lilium* (SIAP, 2018). Estas representan el quinto lugar de flores cortadas a nivel mundial, debido a su gran diversidad de formas y colores (Sahari-Moghaddam y Seyed-Nasir, 2020). El momento óptimo para el corte de las flores está definido por el desarrollo de los botones florales (tallos con 5 o más botones deben de tener por lo menos 2 con color definitivo para el corte) (Francescangeli y Marinangeli, 2018).

2.2.1 Establecimiento del cultivo y requerimientos ambientales

Hay dos épocas de plantación de *Lilium*: de septiembre a noviembre (otoño-invierno) y de enero a marzo (primavera-verano). Los híbridos orientales tienen un ciclo de vida de (70-125 días). El terreno o sustrato donde se hará el trasplante debe de estar bien aireado, con muy bajo contenido de sales, gran cantidad de materia orgánica y con un pH de 6-7 para híbrido asiáticos y de 5 a 6.5 para híbridos orientales. Las densidades de plantación dependerán del tipo de variedad, el tamaño del bulbo y las dimensiones del lugar en donde se realice el trasplante. Generalmente se plantan de 35-55 bulbos m⁻². Se recomienda que el bulbo presente un tamaño mínimo de 10 cm. La profundidad de la plantación sea de 10-12 cm con la punta del bulbo hacia arriba y en posición vertical (Francescangeli y Marinangeli, 2018).

Existen diversos puntos a considerar para obtener un mayor rendimiento y calidad de la flor cortada o en maceta: es necesario un sistema de soporte o tutorado, la humedad relativa óptima debe de ser de 75-80 %, en cuanto a la luz, cuando hay muy poca aparecen hojas pálidas, tallos débiles y aborto de flores, un exceso de luz produce varas cortas y manchones en las hojas y flores. Una vez que el cultivo se ha establecido tanto en campo abierto como en invernadero, se recomienda realizar una fertilización adecuada en función de sus necesidades fenológicas (Francescangeli y Marinangeli, 2018).

2.2.2 Problemática en la poscosecha

La calidad poscosecha de las flores de *Lilium* es una de las principales limitantes para su comercialización, ya que presenta una vida de florero muy corta de 5-14 días, esto dependiendo de la variedad y la manipulación de sus flores, la cual debe de ser mínima debido que la caída de sus tépalos es muy común, además del desprendimiento de polen (Sánchez-Alvear, 2005). Dentro del mercado, la apariencia de las flores es importante porque estos productos dependen principalmente de su valor visual, ya que el comprador espera una apariencia atractiva en un periodo de tiempo no menor a 7 días (Meir y Philosoph-Hadas,

2021). Una escala global de comercio exige que las flores cortadas conserven su calidad poscosecha el mayor tiempo posible. El marchitamiento de los tépalos y el cambio de color son síntomas comunes que limitan la duración de la vida de florero de *Lilium*, por lo que se requiere un manejo adecuado ya que las flores son muy susceptibles a daños mecánicos y deshidratación (Kumari *et al.*, 2017).

La vida de florero está relacionada con la turgencia de las células ya que se disminuye debido a la baja absorción de agua a través de los vasos del xilema y a la pérdida de vapor de agua a través de los estomas, causando así arrugamiento y marchitamiento prematuro de las flores (Sánchez-Navarro *et al.*, 2021). El ion Ca^+ juega un papel importante en la vida de las flores, ya que facilita las conexiones entre polímeros de pectina, aumentando la resistencia mecánica de la pared celular. Además, juega un papel importante en la regulación del equilibrio hídrico. (Mohammadbagheri y Naderi, 2017). Es por esto que es fundamental para la vida de florero.

El proceso de senescencia está asociado al aumento de ROS que degradan la membrana y pared celular. Las ROS ocasionan la degradación de macromoléculas como ADN, proteínas, clorofila, entre otros, que se encargan de diversos procesos fisiológicos que influyen en la vida de florero (Sánchez-Navarro *et al.*, 2021; Spricigo *et al.*, 2021). El silicio es un elemento que aporta grandes beneficios a la célula vegetal, ya que mejora la resistencia de las plantas a los diferentes tipos de estrés, aumentando el contenido de antioxidantes enzimáticos que permiten reducir el contenido de las ROS (Cao *et al.*, 2017).

Para encontrar una solución a la corta vida de florero y al proceso de senescencia, se han desarrollado varias tecnologías poscosecha para aumentar la calidad de diversas especies de importancia en la floricultura. Kumari *et al.* (2017) muestran que la propiedad antioxidante de GA3 a 250 mg L^{-1} contribuye a mejorar la vida de florero del Lirio Asiático (14 días) en comparación al control (11 días). También Krause *et al.* (2021) muestran el aumento en la vida útil de *Lilium pumilum* con la aplicación de sacarosa (20 g L^{-1}), ácido cítrico (100 mg L^{-1}) y tiosulfato de plata (0.2 mM). La aplicación de 600 mg L^{-1} de nanopartículas de silicio en flores de

Lilium aumentó la cantidad de flavonoides en más de un 25 % en comparación al control, mejorando considerablemente la vida de florero. Los metabolitos secundarios (antioxidantes) como son los flavonoides, contrarrestan los efectos dañinos de las ROS producidos en la etapa de la senescencia (Sánchez-Navarro *et al.*, 2021).

2.3 Nanotecnología y nanomateriales

De acuerdo a Prasad (2019), la nanotecnología es un campo de estudio que aplica la manipulación y control de materiales a una escala nanométrica. Este campo abarca diversas disciplinas, como las ciencias físicas, químicas, biológicas, entre otras. Existen una gran diversidad de nanomateriales (NM), y su clasificación comúnmente se basa en sus formas, dimensiones (0D, 1D, 2D y 3D), u origen con las que cuenta el material en escala nanométrica (Panpatte *et al.*, 2016; Shang *et al.*, 2019). Los NM provienen principalmente de fuentes naturales y antropogénicas. La ocurrencia natural de los NM proviene de erupciones volcánicas, tormentas de polvo, minerales, incendios forestales y reacciones fotoquímicas. Los de origen antropogénico se clasifican en incidentales y diseñados, estos son utilizados para la industria, agricultura, medicina, entre otros (Sarraf *et al.*, 2022). Existen diferentes tipos de NM, como los NM inorgánicos no metálicos, NM basadas en carbono, NM metálicos, materiales poliméricos orgánicos, entre otros (Shang *et al.*, 2019). Las propiedades de estos NM han permitido aplicarse con una variedad de fines dentro de la agricultura, por ejemplo, como nanofertilizantes, nanopesticidas, nanoacarreadores, nanobioestimulantes, nanosensores, entre otros (Kamle *et al.*, 2020; Usman *et al.*, 2020).

2.3.1 Nanotecnología en la agricultura

La aplicación de la nanotecnología en la agricultura impulsa a mejorar significativamente el desarrollo sustentable, debido a que promueve la eficiencia de los insumos agrícolas (Zhao *et al.*, 2020; Chhipa, 2019). Es una alternativa que contribuye a solucionar los problemas actuales (Sharif *et al.*, 2020).

La respuesta de las plantas a las nanopartículas (NP) varía según su tamaño, forma, y tipo de NP (Usman *et al.*, 2020). Según Bakshi y Kumar (2021), las NP en la agricultura tienen diversas funciones en el control de plagas y patógenos, así como en el desarrollo de nanobiosensores sensibles a diclorvos que detectan los plaguicidas tóxicos de manera eficiente. El uso actual de diclorvos ocasiona un desequilibrio natural en los cultivos agrícolas, estos pesticidas tóxicos se acumulan en el aire, suelo, agua y alimentos, provocando en el ser humano desórdenes neuronales, genéticos, respiratorios y musculares (Shahcheraghi *et al.*, 2022).

La aplicación de NP en las plantas se hace vía foliar o través del suelo, en concentraciones adecuadas pueden dar efectos positivos sobre las plantas y microfauna del suelo (Phogat *et al.*, 2016). Sin embargo, una dosis alta ocasiona efectos negativos como bajo rendimiento, toxicidad o incluso la muerte del tejido vegetal (Kah, 2015). Estas aplicaciones novedosas permiten ampliar la visión para promover la mejora de los cultivos agrícolas sustentables (Rastogi *et al.*, 2019).

2.3.2 Bioestimulación con nanopartículas

Un bioestimulante es una sustancia orgánica o inorgánica que es aplicado a la planta con el fin de promover respuestas favorables en su crecimiento. Estas respuestas implican modificación del metabolismo de la planta al ocasionar un estímulo de carácter fisicoquímico o biológico (Juárez-Maldonado *et al.*, 2019).

Los bioestimulantes intervienen en la estabilidad de la membrana plasmática dentro de la célula vegetal ya que aumentan el contenido de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos (metabolitos secundarios) (Jardin, 2015). Se clasifican en siete categorías: bacterias benéficas, hongos benéficos, ácidos húmicos y fúlvicos, extracto de algas, hidrolizados de proteínas, quitosano y otros biopolímeros (Franzoni *et al.*, 2022). Algunas de las ventajas que proporcionan es la tolerancia a diversos tipos de estrés, aumentan la eficiencia de los recursos, incrementan la disponibilidad de nutrientes y promueven el crecimiento y desarrollo de las plantas (Juárez-Maldonado *et al.*, 2019).

Las NP juegan un papel importante en la protección de las plantas contra diversos tipos de estrés. Ya que generan una serie de respuestas que implican la sobreexpresión de diferentes tipos de genes y enzimas que ayudan a contrarrestar el estrés oxidativo (Khan *et al.*, 2017; Prasad *et al.*, 2017). Se sabe que las plantas a nivel basal producen ROS como resultado de reacciones bioquímicas en la célula vegetal. Estos radicales libres sirven de señalización, involucrándose en el crecimiento y la defensa celular. Sin embargo, un exceso puede producir efectos negativos, debido a que oxidan diversas biomoléculas que participan en procesos metabólicos y fisiológicos provocando un estrés y con ello deficiencias a nivel morfológico y anatómico (Behbahani *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2020).

La entrada y absorción de las NP por parte de la célula vegetal es canalizada por proteínas portadoras como son las acuaporinas o a través de canales iónicos (endocitosis) (Raliya *et al.*, 2018).

Es probable que las NP y los NM induzcan la bioestimulación debido a su alto valor superficie/volumen, ya que tienen una mayor capacidad de interactuar con su entorno y presentan una mayor carga superficial en comparación con las partículas más grandes. La primera interacción bioestimuladora entre células y NP parece ser fisicoquímica y la segunda fase resulta de la serie de estímulos bioquímicos desencadenados por las alteraciones en las membranas. La fijación de las NP a la superficie de la célula vegetal depende directamente de sus cargas (Juárez-Maldonado *et al.*, 2019). Por ejemplo, Khan *et al.* (2017) muestra que el uso de las nanopartículas de dióxido de titanio (TiO₂) tienen un efecto bioestimulantes debido a que aumenta la cantidad de clorofilas y carotenoides en gramíneas, mejorando también la calidad nutricional del grano. Además otras nanopartículas como las de quitosano se pueden utilizar como promotores de crecimiento vegetal y como agente plaguicida contra bacterias, virus y hongos patogénicos (Prasad *et al.*, 2017).

2.3.3 Sistema de defensa antioxidante

La membrana celular es una barrera protectora de las células vegetales, que desempeña diversos papeles de importancia entre ellos el transporte de sustancias al interior de la célula, transmisión de energía y la traducción de señales (Dangi *et al.*, 2018). La permeabilidad selectiva de la membrana le permite regular la homeostasis redox y asegurar las actividades fisiológicas de las plantas. Sin embargo, bajo condiciones de estrés biótico y abiótico, la producción excesiva de ROS ocasionan daños destruyendo así su estructura y funcionalidad (Hao *et al.*, 2021). Para defenderse de los radicales libres y formas no radicales provocados por el estrés oxidativo, las plantas tienen sistemas de defensa antioxidantes enzimáticos (superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), ascorbato peroxidasa (APX), glutatión reductasa (GR), entre otras), y antioxidantes no enzimáticos (vitamina A, C, E, glutatión, ascorbato, tocoferol, carotenoides, fenoles, flavonoides, entre otros) que le permiten contrarrestar los radicales libres (Hao *et al.*, 2021; Khan *et al.*, 2017).

La activación del sistema de defensa antioxidante se lleva a cabo principalmente por una red de señalizaciones que activa la maquinaria molecular contra el estrés. El calcio (Ca^{+2}) actúa como segundo mensajero y desempeña un papel importante en la señalización de las respuestas a diversos tipos de estrés oxidativo (Bhatla y Lal, 2018). Se ha demostrado que el óxido nítrico (NO) induce la elevación de Ca^{+2} citosólico en células vegetales expuestas a estrés biótico y abiótico (Belete, 2018).

Las NP juegan un papel importante en la protección de las plantas contra el estrés al estimular las actividades de las enzimas antioxidantes, osmolitos, aminoácidos libres y nutrientes (Khan *et al.*, 2017). De acuerdo con Shahcheraghi *et al.* (2022) aunque las NP tiene un tamaño considerablemente menor que los organos celulares, su dimension les permite interactuar de manera efectiva con las membranas celulares, su entrada puede ser a través de canales o poros específicos presentes en las membranas celulares. A pesar de que las dimensiones de las NP y orgánulos celulares son diferentes, las propiedades físicas y químicas de la NP permiten aprovechar estos canales para penetrar en la célula y realizar sus

funciones específicas dentro de ella (Juárez Maldonado *et al.*, 2019). Estas NP funcionan como moléculas señalizadoras en condiciones de estrés y a su vez provocan la expresión de ciertos genes implicados en los mecanismos de defensa contra el estrés oxidativo (Marslin *et al.*, 2017). Esto permite que se tenga en control las ROS debido a la producción de biomoléculas reguladoras como la NADPH oxidasa, Glutación (GSH), SOD, Peroxidasa (POX), entre otras (Sarraf *et al.*, 2022).

2.4 Nanopartículas de silicio

El silicio (Si) es el metaloide más abundante de la corteza terrestre ya que representa el 28 % de su masa total. Además, la gran mayoría de los suelos contienen Si (70 %) y se puede encontrar en forma de silicato (silicio-oxígeno) o silicatos de aluminio, calcio y potasio, a pesar de su abundancia pocas veces está disponible para las plantas (Etesami y Ryong-Jeong, 2023). La forma en que el Si es absorbido por las plantas es como ácido silícico ($\text{Si}(\text{OH})_4$). Dentro de la planta este desempeña un papel importante ya que se acumula en diversos tejidos, si bien es considerado como elemento no esencial, pero sí benéfico (Etesami y Ryong-Jeong, 2018). Recientemente, el Instituto Internacional de Nutrición Vegetal lo incluye como elemento “cuasi-esencial” (Liu, 2019). Se ha demostrado que el Si promueve la fuerza mecánica de las plantas ya que se acumula en la membrana y pared celular lo que le permite actuar como barrera física para diversas condiciones de estrés biótico y abiótico (Yan *et al.*, 2018). La acumulación de Si en la pared celular limita la pérdida de agua de la cutícula y la transpiración excesiva, también permite el aumento de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos (Avestan *et al.*, 2019; Etesami y Ryong-Jeong, 2023).

La aplicación de Si en forma de NP reduce diversos efectos nocivos provocados por condiciones de estrés. Farhangi-Abriz y Torabian (2018) muestran que la aplicación foliar de óxido de nanosilicio (nano-SiO₂) en concentraciones de 0.5 y 1 mM mejoran el crecimiento de brotes y raíces de plántulas de soja, también reducen los efectos nocivos del estrés hídrico. Chen *et al.* (2018) indican que la aplicación de nanosilicio reduce la cantidad de cadmio en plantas de arroz. Alam

et al. (2022) observaron que la aplicación de NP de Si en plantas de tomate aumenta significativamente el crecimiento, altura, peso seco, fotosíntesis neta, conductancia estomática, transpiración y la actividad de enzimas antioxidantes.

2.5 Nanopartículas de calcio

El calcio es un macroelemento esencial de las plantas que participa en diversas funciones fisiológicas y metabólicas (Upadhyaya *et al.*, 2017). Dentro de la planta no es un elemento móvil y es absorbido a través de sus raíces como Ca^{+2} . Este catión cumple una doble función dentro de la célula vegetal ya que permite la estabilización de la membrana y pared celular, además actúa como señalizador dentro del citosol (Thor, 2019). La concentración de Ca^{+2} en el citosol se mantiene alrededor de 0.1 mM, un aumento genera una serie de respuesta que se expresa en la codificación de diversas proteínas que actúan en la activación del sistema de defensa (Aldon *et al.*, 2018).

Existen cuatro familias de proteínas que se unen directamente al Ca^{+2} en las plantas: calmodulina (CaM), las proteínas quinasas (CDPK), las proteínas similares a la calmodulina (CML) y las proteínas similares a la calcineurina B (CBL) (Aldon *et al.*, 2018; Upadhyaya *et al.*, 2017). Según Mohammadbagheri y Naderi (2017) el calcio es un elemento que permite mejorar la calidad de las flores debido a que juega un papel importante en la pared celular, aumentando las conexiones poliméricas de pectocelulosa dando como resultado mayor resistencia mecánica al organelo, otro beneficio es que proporciona estabilidad osmótica dentro de la membrana celular lo que se reduce a una mejora en la calidad poscosecha.

Las NP debido a su tamaño tienen una mayor interacción dentro de la célula. Khan *et al.* (2017) muestran la representación del mecanismo de defensa celular en condiciones ambientales estresantes, bajo influencia de las NP e indica que estas provocan una sobreexpresión de proteínas fijadoras de Ca^{+2} (CaBP), debido a que imitan a Ca^{+2} y se unen a CaBP. Lo que permite que las NP actúen como

señalizadoras de estrés induciendo así la expresión de genes relacionados con el sistema de defensa antioxidante, manteniendo las ROS bajo control.

La aplicación de nanopartículas de Ca-Si en plantas de *Lilium*, bajo estrés salino aumentó el contenido de vitamina C (9.4 %) y capacidad antioxidante (20 %), permitiendo contrarrestar los efectos negativo del estrés salino (Gómez-Santos *et al.*, 2023). Además, Ranjbar *et al.* (2018) muestran que la aplicación vía foliar de NP de calcio mejora la calidad poscosecha de la manzana.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del experimento

El experimento se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. En un invernadero tipo capilla con cubierta de policarbonato y sistema de ventilación con pared húmeda, ubicado en el Departamento de Forestal.

3.2 Material vegetal

Se utilizaron bulbos de *Lilium* tipo oriental de la variedad "Tabledance" (híbrido de *Lilium auratum* y *Lilium speciosum*). Estos fueron adquiridos en "Viveros el Volcán S.A. de C.V." en Villa Guerrero, Estado de México, México.

3.3 Desarrollo del cultivo

Se utilizó una mezcla de sustrato de Peat-Moss y perlita en proporción 1:1 con base a volumen, el sustrato se colocó en bolsas de polietileno de 4 L. Posteriormente se hizo el acomodo de las bolsas en el invernadero acorde al diseño experimental correspondiente. Se utilizó un sistema de riego dirigido con solución Steiner al 25 % durante todo el desarrollo del cultivo, la concentración de calcio utilizada fue de 45 ppm (Steiner, 1961). El pH de la solución se ajustó a 6.5 con ácido sulfúrico (H_2SO_4). La temperatura promedio fue 28 °C durante el día y 17 °C durante la noche, con una radiación fotosintética activa de $560 \mu m m^{-2} s^{-1}$ en las horas de máxima radiación, la humedad relativa se mantuvo en un rango de 40-70 %.

3.4 Características de las nanopartículas de calcio-silicio

Las nanopartículas de calcio y silicio 1 y 2 (CaSi-1) (CaSi-2) se caracterizaron por difracción de rayos X (Fig. 1A), los difractogramas de ambas muestras presentaron un pico amplio ubicado a 23.19° y 21.38° en la escala 2 theta correspondiente a CaSi-1 y CaSi-2 respectivamente (parte amorfa). Además, presentaron picos finos en $2\theta = 29.3^\circ$ y 32° - 50° correspondientes al cristalino parte. El diámetro promedio de partícula se calculó basándose en el pico 29.3° y utilizando la ecuación de Debye-Scherrer, se determinó que las muestras de CaSi-1 y 2 presentaron un diámetro de 23.29 nm y 15.29 nm respectivamente. El análisis termogravimétrico (TGA) de las NP CaSi-1 y CaSi-2 fue realizado para determinar el contenido de calcio y silicio como residuos inorgánicos (Fig. 1B). El contenido de residuos inorgánicos en CaSi-1 fue 62 %, mientras que en CaSi-2 fue de 87 % (Gómez-Santos *et al.*, 2023).

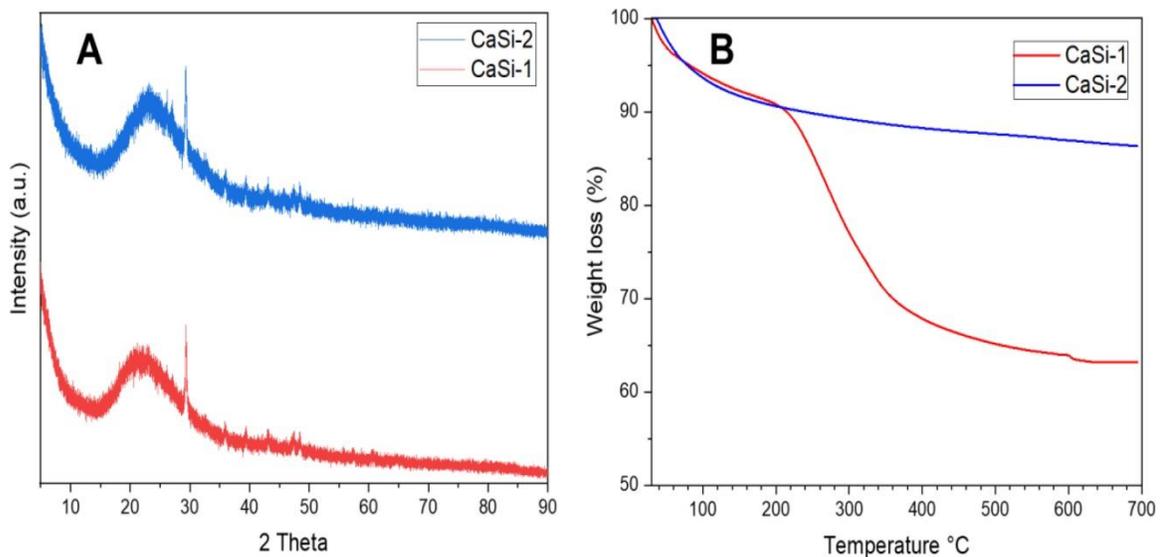


Figura 1. Difractogramas XRD (A) y termogramas TGA (B) de nanopartículas de CaSi-1 y CaSi-2 (Gómez-Santos *et al.*, 2023).

3.5 Aplicación de tratamientos

Se aplicaron dos tipos de nanopartículas de calcio-silicio (CaSi-1 (NP1) y CaSi-2 (NP2)) vía foliar, cada 15 días, a partir de la formación de las primeras hojas verdaderas. Las concentraciones utilizadas para ambas nanopartículas fueron 750 mg L⁻¹ y 500 mg L⁻¹, además de un control (T0) (Cuadro 1). Los tratamientos, vías y momento de aplicación fueron seleccionados con base al trabajo realizado por Sánchez-Navarro *et al.* (2021).

El experimento constó de cinco tratamientos, cinco repeticiones y cuatro plantas por repetición, para un total de 100 plantas.

Tratamientos	Dosis	Abreviatura
CaSi-1	750 mg L ⁻¹	NP1-750
CaSi-1	500 mg L ⁻¹	NP1-500
CaSi-2	750 mg L ⁻¹	NP2-750
CaSi-2	500 mg L ⁻¹	NP2-500
Control	0	T0

Cuadro 1. Tratamientos y concentraciones de nanopartículas de calcio-silicio (1 y 2).

3.6 Variables agronómicas (calidad de las flores)

Para evaluar el efecto de los tratamientos sobre las flores, se tomó en consideración medir el número de flores por planta, el tamaño del botón floral antes de su apertura (longitud de flor cerrada) (se tomó del 1-3 botón una vez que este tornó un color uniforme y se midió con un flexómetro desde el cáliz hasta el ápice) y el diámetro de la flor abierta. Además, se cuantificaron los días de apertura de la flor hasta la caída del primer pétalo (vida de flor). Una vez terminado el ciclo del cultivo (119 días), se pesó la biomasa fresca de las flores y

su biomasa seca (se pusieron las muestras en una estufa de secado (Drying Oven) durante 72 horas a una temperatura de 100 °C).

3.7 Variables bioquímicas

Se colectaron muestras de hojas (se tomaron las primeras cuatro hojas junto al primer botón floral) y flor (se consideró tomar el tercer botón floral una vez que este torno un color uniforme) se almacenaron a 4 °C y posteriormente se liofilizaron y maceraron con un mortero de mano hasta obtener un polvo fino.

3.7.1 Clorofilas

Los contenidos de clorofila *a*, *b* y total ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ DW}$) fueron determinados según el método de Nagata y Yamashita (1992). La muestra liofilizada (10 mg) se mezcló con 2 mL de hexano: acetona (3:2). Posteriormente las muestras fueron sometidas a un baño de ultrasonidos durante 5 minutos. Luego se centrifugaron a $15.000 \times g$ durante 10 minutos a 4 °C. Se eliminó el sobrenadante y se leyeron las absorbancias a 645 y 663 nm, y los valores obtenidos se utilizaron en las Ecuaciones (1) y (2).

$$\text{Clorofila } a = 0.999 \cdot A_{663} - 0.0989 \cdot A_{645} \quad (1)$$

$$\text{Clorofila } b = 0.328 \cdot A_{663} + 1.77 \cdot A_{645} \quad (2)$$

3.7.2 Vitamina C

El contenido de ácido ascórbico o vitamina C ($\text{mg } \text{g}^{-1} \text{ DW}$) se realizó mediante el método de Hung y Yen (2002). Se pesaron 10 mg de tejido liofilizado y se colocaron en un microtubo de 2 mL. Posteriormente se agregó 1 mL de ácido metafosfórico (HPO_3) al 1 % y se filtró en un papel Whatman N°1. Se recolectaron 0.2 mL de la extracción y se agregó 1.8 mL de 2-6 diclorofenolindofenol (100 mM) dejándose a temperatura ambiente por 15 segundos. La cuantificación se realizó por espectrofotometría (Unico Spectrophotometro Model UV2150) a 515 nm en una celdilla de cuarzo. Para el blanco se utilizó ácido metafosfórico.

3.7.3 Fenoles

El contenido de fenoles totales (mg g^{-1} PS) se determinó mediante el método del reactivo Folin-Ciocalteu descrito por Yu y Dahlfren (2000). Se pesaron 100 mg de muestra liofilizada en un microtubo de 2 mL. Se agregó 1 mL de solución agua: acetona (1:1), se homogeneizó en un vórtex durante 30 segundos. Posteriormente se sometió a la microcentrifugadora (OHAUS Frontier Modelo FC5515 R) a 17,500 x g durante 10 minutos a 4 °C. Del sobrenadante se toma 18 μL y se coloca en un tubo de ensayo Eppendorf de 2000 μL , se adiciona también 70 μL de Folin-Ciocalteu, 175 μL de carbonato de sodio (Na_2CO_3) al 20 % y 1750 μL de agua destilada. Las muestras se colocaron en un baño de agua a 45 °C durante 30 minutos, para finalmente medir la absorbancia a 750 nm en un espectrómetro Uv-Vis (Unico Spectrophotometro Model UV2150). Los fenoles totales se expresaron en mg EQ de ácido gálico por gramo de peso seco (DW).

3.7.4 Flavonoides

Se llevó a cabo por el método de Arvouet-Grand *et al.* (1994). Para la extracción se pesaron 20 mg de muestra liofilizada. Posteriormente se adiciono 2 mL de metanol de grado reactivo, se homogeneizó en un vórtex durante 30 segundos, la mezcla se filtró usando papel Whatman N°1. Para la cuantificación se tomó del sobrenadante 1 mL, se le adiciono 1 mL de solución metanólica de tricloruro de aluminio (AlCl_3) al 2 % en un tubo de ensayo y se dejó reposar durante 20 minutos en la oscuridad. La lectura de la absorbancia se hizo a través de un espectrofotómetro UV-Vis (Unico Spectrophotometro Model UV2150) a una longitud de onda de 415 nm utilizando una celdilla de cuarzo. Los resultados se expresaron en mg EQ de quercetina por 100 gramos de DW.

3.7.5 Capacidad antioxidante (DPPH)

La capacidad antioxidante se determinó mediante el DPPH (1,1-difenil-2-picrilhidrazil) método para compuestos hidrofílicos y lipófilos (Brand-Williams *et al.*, 1995). La capacidad antioxidante total (TAC) se obtuvo añadiendo los compuestos hidrofílicos y lipófilos. La solución madre se preparó mezclando 2.5

mg de DPPH radical con 100 mL de metanol. En una microplaca se adicionaron 6 μL del extracto de cada muestra con buffer de fosfatos o hexano: acetona, posteriormente se agregaron 234 μL de DPPH radical (0.1 mM). La mezcla se homogeneizó cuidadosamente. Para el blanco se utilizó 240 μL de metanol. La absorbancia se tomó a 515 nm después de 30 minutos. Los compuestos hidrofílicos se determinaron usando buffer de fosfatos como solución de extracción, mientras que para los lipófilos se usó hexano: acetona. Los resultados se expresaron como equivalentes de ácido ascórbico ($\mu\text{mol g}^{-1}$ DW).

3.7.6 Peróxido de hidrógeno (H_2O_2)

Se determinó de acuerdo al método de Velikova *et al.* (2000) se expresó como ($\mu\text{mol g}^{-1}$ DW). Se pesaron 10 mg de muestra liofilizada y se agregó 1 mL de ácido tricloroacético al (0.1 %) frío. Posteriormente se centrifugó (OHAUS Frontier Model FC5515 R) a 12,000 x g por 15 minutos a 4 °C. Se recolectó el sobrenadante. Para la lectura se colocó en un microtubo 250 μL del sobrenadante, 750 μL de buffer de fosfato pH 7.0 (0.01 M) y 1 mL de yoduro de potasio (1 M). Se determinó la absorbancia a 390 nm.

3.7.7 Malondialdehído (MDA)

Se determinó según la metodología descrita por Velikova *et al.* (2000) y se expresó como ($\mu\text{mol g}^{-1}$ DW). Se pesaron 50 mg de muestra liofilizada y se le agregó 1000 μL de ácido tiobarbitúrico (TBA) (0.1 %). Posteriormente se centrifugó a 10,000 x g durante 20 min. En un tubo de ensayo se agregó 500 μL del sobrenadante y 1000 μL de TBA (0.5 %) en ácido tricloroacético (20 %). La mezcla se incubó en agua hirviendo durante 30 minutos y se detuvo la reacción con un baño de hielo, posteriormente se centrifuga la muestra a 10,000 x g durante 5 minutos y se determina la absorbancia del sobrenadante a 532 nm. La cantidad de complejo MDA-TBA (pigmento rojo) fue calculado a partir del coeficiente de extinción $155 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$.

3.8 Análisis estadísticos

El diseño experimental utilizado fue un cuadro latino (5x5) con cinco tratamientos, cinco repeticiones y cuatro plantas por unidad experimental (100 plantas) (Fig.2). Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza y una prueba de medias de Fisher LSD ($p < 0.05$), realizados mediante el software InfoStat versión 2020.



Fig. 2. Distribución de tratamientos en el área de estudio.

4. RESULTADOS

4.1 Variables agronómicas (calidad de flor)

Se observaron efectos positivos con la aplicación de nanopartículas de Ca-Si en la calidad de las flores de *Lilium*. Las NP1-750, NP2-500 y NP2-750 aumentaron la longitud de la flor cerrada (3-4 %) en comparación al T0 (Fig. 3A). La biomasa fresca de las flores también presentó un aumento con los tratamientos NP1-750, NP2-500 y NP2-750 en un rango de 38.4 % a 57.9 % respecto al T0 (Fig. 3D). El diámetro de flor abierta fue incrementado por todos los tratamientos con NP (Fig. 3B).

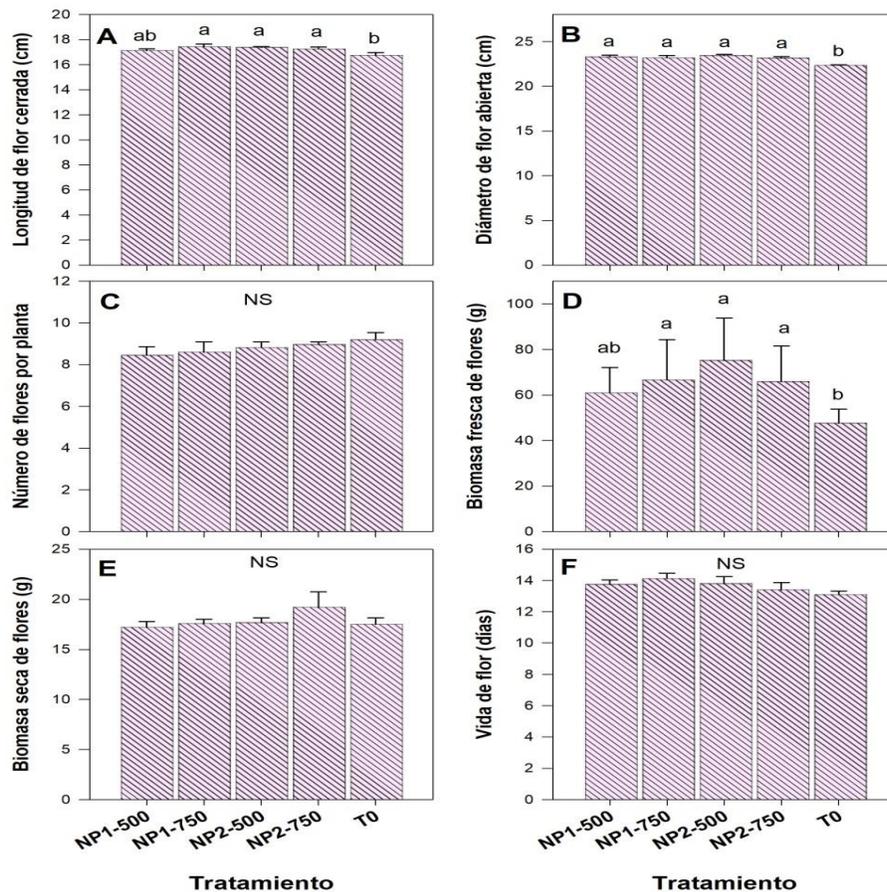


Figura 3. Efecto de las nanopartículas de calcio-silicio en la calidad de flores de *Lilium*. T0: control; NP1: nanopartículas de calcio-silicio uno; NP2: nanopartículas de calcio-silicio dos; 500 y 750 indican la cantidad aplicada de nanopartículas de calcio-silicio en mg L⁻¹. NS: no significativo, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de LSD de Fisher ($p < 0.05$).

4.2 Variables bioquímicas

La aplicación de nanopartículas de Ca-Si no modificó el contenido de clorofila en flores de *Lilium* (Fig. 4).

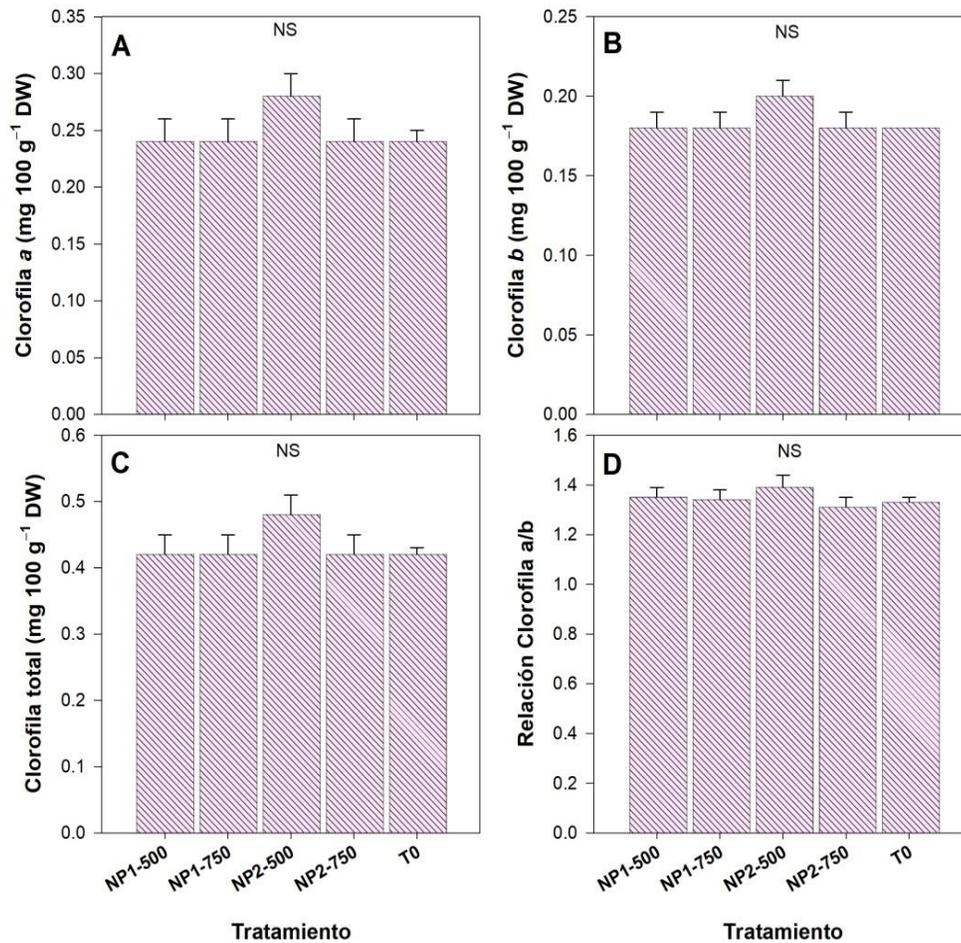


Figura 4. Efecto de las nanopartículas de calcio-silicio sobre el contenido de clorofila y la relación clorofila *a/b* en flores de *Lilium*. T0: control; NP1: nanopartículas de calcio-silicio uno; NP2: nanopartículas de calcio-silicio dos; 500 y 750 indican la cantidad aplicada de nanopartículas de calcio-silicio en mg L⁻¹. NS: no significativo, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de LSD de Fisher ($p < 0.05$).

El contenido de clorofila *a* aumentó significativamente en las hojas de *Lilium* con los tratamientos NP2-500 (20 %) y NP2-750 (27.5 %) respectivamente en comparación al T0 (Fig. 5A).

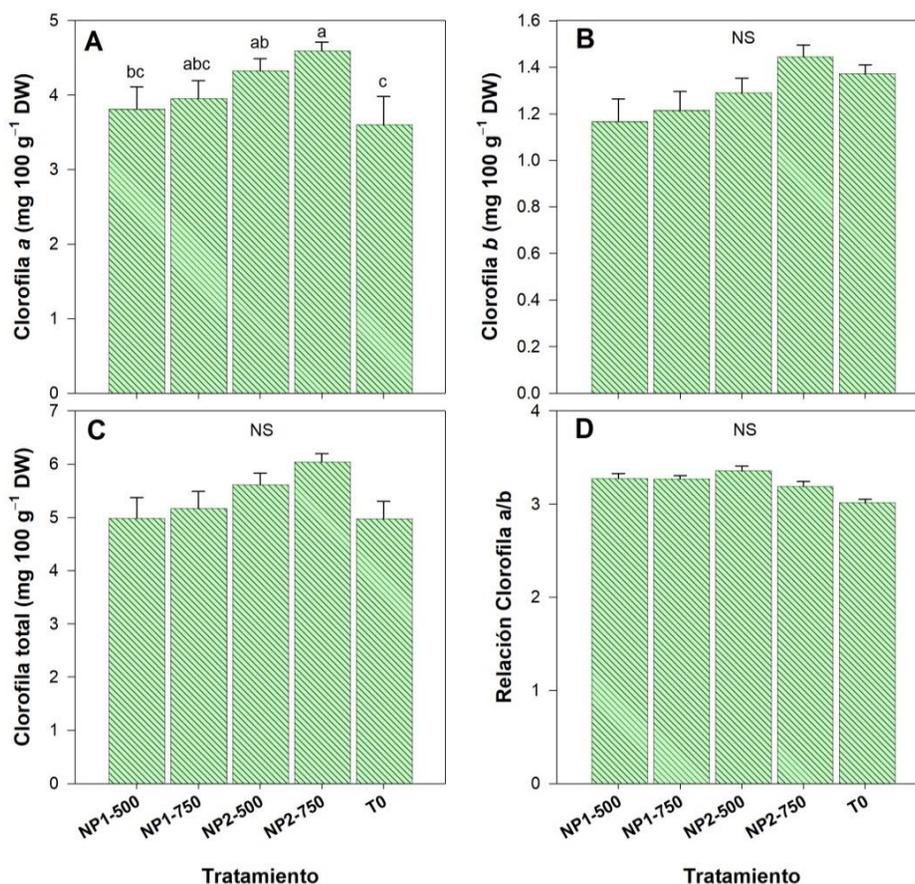


Figura 5. Efecto de las nanopartículas de calcio-silicio sobre el contenido de clorofila y la relación clorofila *a/b* en hojas de *Lilium*. T0: control; NP1: nanopartículas de calcio-silicio uno; NP2: nanopartículas de calcio-silicio dos; 500 y 750 indican la cantidad aplicada de nanopartículas de calcio-silicio en mg L⁻¹. NS: no significativo, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de LSD de Fisher ($p < 0.05$).

El contenido de vitamina C en flores de *Lilium* aumentó significativamente con el tratamiento NP1-750 un 40 % en comparación con el T0 (Fig. 6A). El mayor contenido de fenoles se presentó en los tratamientos NP2-750 y NP1-750, Sin embargo, fueron estadísticamente iguales al control (Fig. 6B). El menor contenido de flavonoides lo presentó el T0, mientras que las plantas que fueron tratadas presentaron un aumento significativo, NP1-750 y NP2-500 incrementaron en un 17.6 % y 24.7 %, respectivamente (Fig. 6C). La capacidad antioxidante de compuestos hidrófilos aumentó considerablemente en un rango de 11 % a 21 % con los tratamientos NP1-500, NP2-500 y NP2-750 (Fig. 6D). Para los compuestos lipófilos, los tratamientos que mostraron un incremento en comparación al control (T0), fueron las NP2-500 (14.6 %) y NP2-750 (10.4 %), como se ilustra en la Figura. 6E.

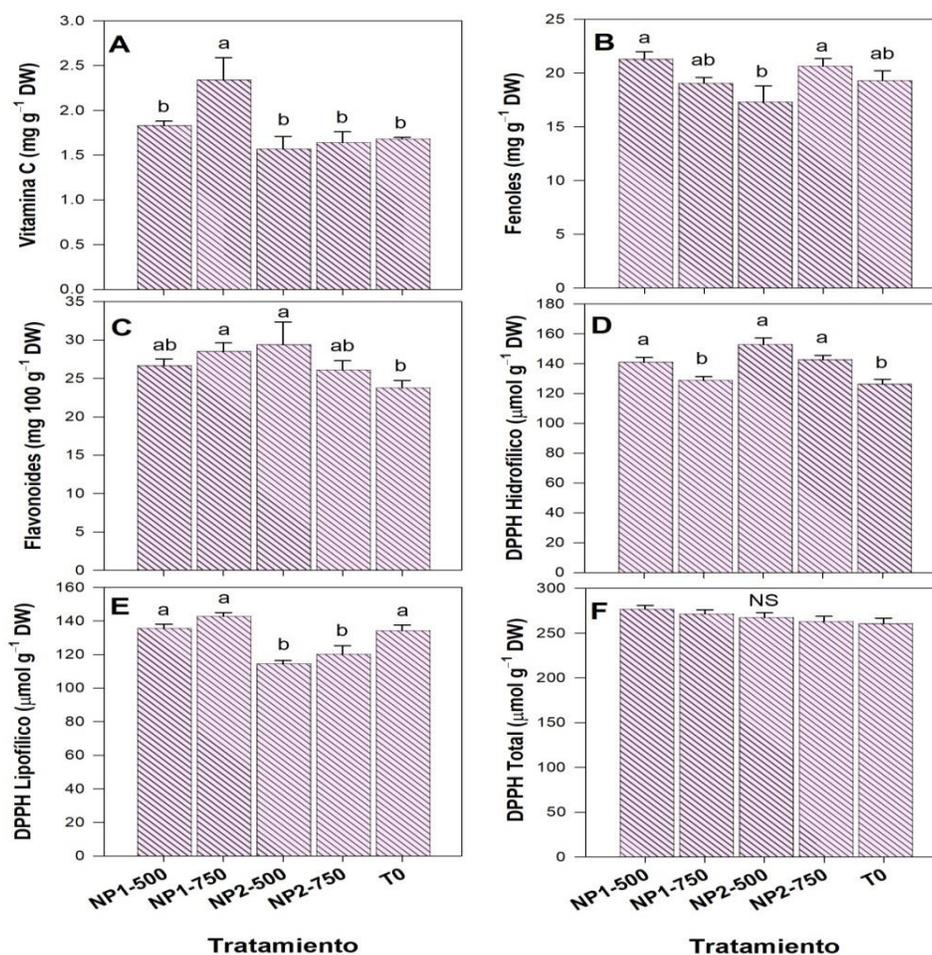


Figura 6. Efecto de las nanopartículas de calcio-silicio sobre el contenido de antioxidantes y capacidad antioxidante en flores de *Lilium*. T0: control; NP1: nanopartículas de calcio-silicio uno; NP2: nanopartículas de calcio-silicio dos; 500 y 750 indican la cantidad aplicada de nanopartículas de calcio-silicio en mg L⁻¹. NS: no significativo, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de LSD de Fisher (p < 0.05).

El contenido antioxidante en las hojas de *Lilium* fue modificado por la aplicación de nanopartículas de Ca-Si. El contenido de vitamina C aumentó un 84.7 % con el tratamiento NP2-500 en comparación con el T0 (Fig. 7A). Para la capacidad antioxidante de los compuestos hidrófilos, se observó que el tratamiento NP2-500 mostró una disminución del 15.8 % en comparación al T0. Además, de que los tratamientos NP2-750 Y NP1-750 también presentaron reducciones del 12 % y 13.5 %, con respecto al T0 (Fig. 7D).

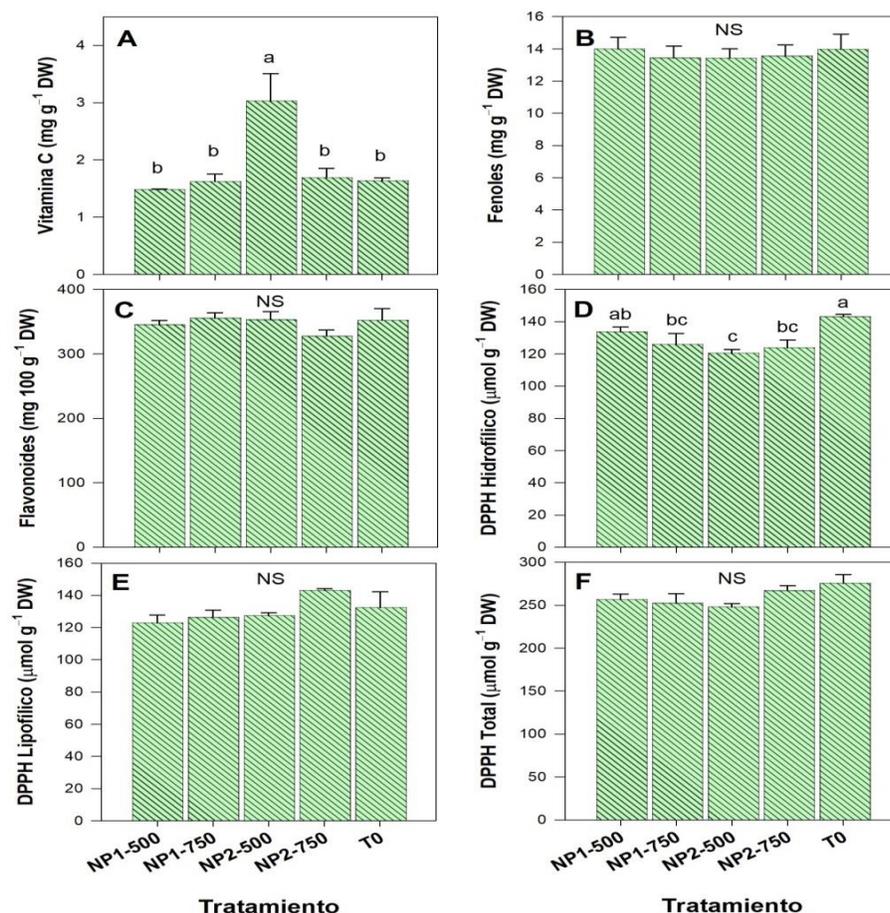


Figura 7. Contenido de antioxidantes y capacidad antioxidante en hojas de *Lilium* bajo el efecto de las nanopartículas de calcio-silicio. T0: control; NP1: nanopartículas de calcio-silicio uno; NP2: nanopartículas de calcio-silicio dos; 500 y 750 indican la cantidad aplicada de nanopartículas de calcio-silicio en mg L⁻¹. NS: no significativo, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de LSD de Fisher (p < 0.05).

El contenido de H₂O₂ en hojas de *Lilium* no presenta diferencias significativas entre tratamientos (Fig. 8A). Sin embargo, en las flores aumentó con los tratamientos NP1-750 y NP2-750 en un 16.7 % y 13.2 % en comparación al T0 (Fig. 8C). El contenido de MDA en hojas de *Lilium* aumentó significativamente en todos los tratamientos en comparación al T0 (Fig. 8B). El contenido de MDA en flores de *Lilium* también fue incrementado con el tratamiento NP2-750 en un 29.8 % respecto al T0 (Fig. 8D).

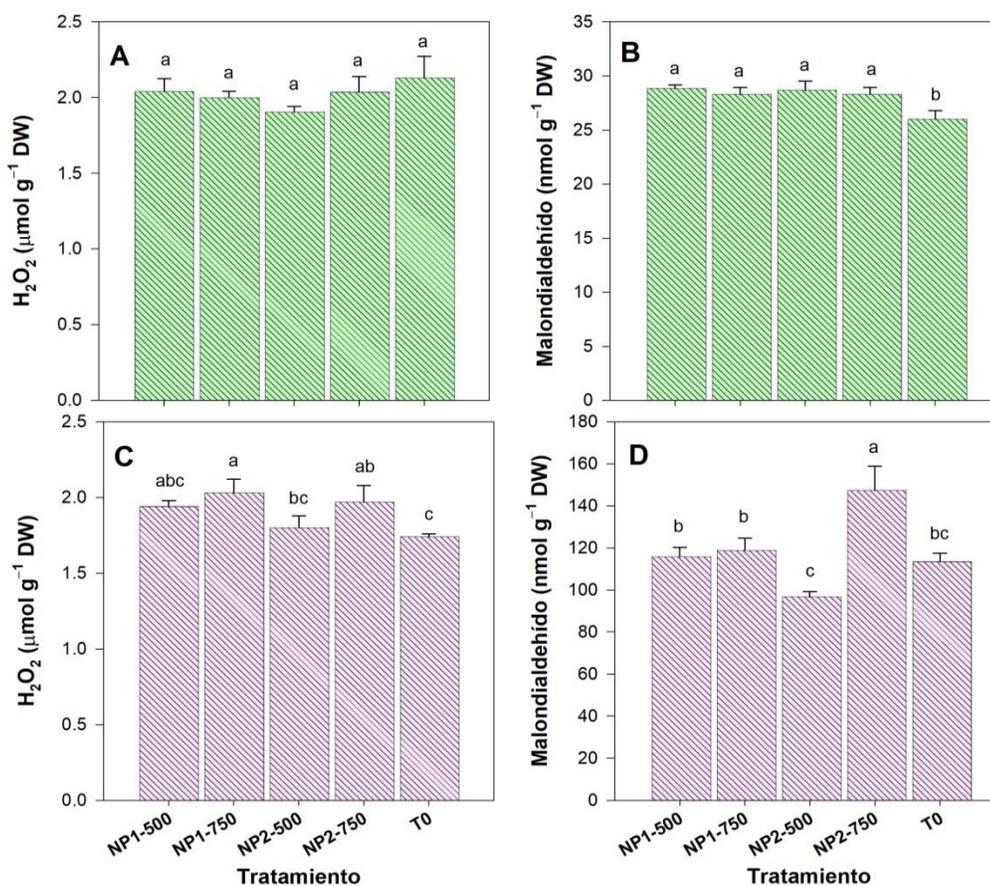


Figura 8. Efecto de las nanopartículas de calcio-silicio sobre el contenido de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y malondialdehído (MDA) en hojas (A y B) y flores (C y D) en *Lilium*. T0: control; NP1: nanopartículas de calcio-silicio uno; NP2: nanopartículas de calcio-silicio dos; 500 y 750 indican la cantidad aplicada de nanopartículas de calcio-silicio en $mg L^{-1}$. NS: no significativo, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de LSD de Fisher ($p < 0.05$).

5. DISCUSIÓN

La senescencia monocárpica es un proceso genéticamente codificado que influye en la abscisión (proceso por el cual el órgano senescente se separa de la planta) de todas las plantas después de su ciclo reproductivo. Algunas hormonas como el etileno y el ácido abscísico promueven la senescencia en los distintos órganos de la planta (Taiz y Zeiger, 2006). La senescencia de las flores tiene una amplia relación con la peroxidación lipídica de los pétalos, debido al incremento de las ROS (Lu *et al.*, 2020). Estas formas de oxígeno presentan un electrón sin aparear en su última órbita que les permite la unión con macromoléculas como el ADN, ARN, proteínas y clorofilas (Tak *et al.*, 2018). Lo que conduce a la degradación de tejidos como la membrana plasmática y la pared celular, teniendo como consecuencia la disminución de calidad y vida útil de las flores (Sánchez-Navarro *et al.*, 2021).

En la presente investigación, las flores de *Lilium* tratadas con nanopartículas de Ca-Si en sus diferentes formas y concentraciones, no presentaron ninguna anomalía o toxicidad que disminuyera la calidad de las flores. Por el contrario, incrementaron la longitud de la flor cerrada, y el diámetro de la flor abierta (Fig. 3A y 3B). Las NP generan efectos positivos en las plantas ya que presentan una magnitud nanométrica (1-100 nm) que permite la interacción con estructuras celulares y diferentes orgánulos, induciendo la modificación del ADN y algunas vías metabólicas (Juárez-Maldonado, 2023). Esto se debe a que las NP modifican la señalización de las membranas, lo que impacta en el metabolismo y la expresión de sus genes. Este estímulo surge de la interacción de cargas superficiales de las NP con las superficies celulares (Juárez-Maldonado *et al.*, 2019). Tofighi-Alikhani *et al.* (2021) obtuvieron resultados favorables en la calidad y longevidad de las flores de *Gerbera jamesonii* con la aplicación de 20 mg L⁻¹ de NP de SiO₂.

El contenido de pigmentos fotosintéticos en la hoja y la buena asimilación de nutrientes, sirven como biomarcadores para las condiciones fisiológicas de la planta, una mayor síntesis de clorofila mejora considerablemente la funcionalidad del aparato fotosintético incrementado la producción de biomasa (Salachna *et al.*, 2019). En los resultados obtenidos, la aplicación de NP aumentó tanto el contenido de biomasa fresca como el de clorofila *a* en la hoja (Fig. 3D y 5A). El incremento de clorofila también puede estar relacionado a los efectos benéficos que tienen las NP en concentraciones adecuadas, ya que estas estimulan la biosíntesis de las clorofilas a través de la producción de proteínas LCH (Shahcheraghi *et al.*, 2022). Sánchez-Navarro *et al.* (2021) observaron que la aplicación foliar de nanopartículas de SiO₂ (1000 mg L⁻¹) incrementó el contenido de clorofila *a* (64.25 %) en hojas de *Lilium*. Según Salachna *et al.* (2019), la aplicación de NP de plata a 100 mg L⁻¹ incrementó el contenido de pigmentos fotosintéticos en las hojas de lirio.

Las NP penetran la membrana celular vía endocitosis por medio de los canales iónicos, una vez dentro de la célula estas producen una reacción bioestimulante (Garza-Alonso *et al.*, 2023; Raliya *et al.*, 2018). La primera interacción bioestimuladora entre células y nanopartículas parece ser fisicoquímica y la segunda fase son estímulos bioquímicos desencadenados por las alteraciones en las membranas, donde se producen modificaciones en la expresión génica, traducción de proteínas, metabolitos de señalización y secundarios que actúan como mecanismo de defensa antioxidante (enzimático y no enzimático) contra las ROS (Juárez-Maldonado *et al.*, 2019; Garza-Alonso *et al.*, 2023).

Unos de los principales efectos en la aplicación de estos nanomateriales es la modificación de la ruta de fenilpropanoides, en donde se sintetizan compuestos como los flavonoides (Boudet, 2007). Los flavonoides son moléculas generadas por el metabolismo secundario de las plantas y son originados por la ruta del ácido shikímico y la ruta de los policétidos. El contenido de flavonoides en la flor se incrementó con la aplicación de las nanopartículas de calcio-silicio (Figura 6C).

Rastogi *et al.* (2019) observaron que las nanopartículas de silicio forman una película binaria en la pared celular, lo que permite su fortalecimiento. Esto le da la capacidad a la célula de reducir la transpiración, mejorando así las condiciones de estrés, evitando sobreproducción de ROS. Otro metabolito secundario encargado de contrarrestar el estrés oxidativo es el ácido l-ascórbico (vitamina C), este tiene la función donar electrones a las ROS, como el oxígeno singlete, anión superóxido y los radicales hidroxilos (Paciolla *et al.*, 2019). Los resultados obtenidos indican que el contenido de vitamina C en la hoja se incrementó con la aplicación de las nanopartículas 2 a 500 mg L⁻¹ (Figura 7A). González-García *et al.* (2022) muestran un incremento de vitamina C en plántulas de tomate, tratadas con la aplicación foliar de nanomateriales de carbono.

El estrés es cualquier cambio desfavorable en la fisiología de la planta que induzca una señal de advertencia. El H₂O₂ se considera una especie reactiva de oxígeno que es capaz de generar radicales libres ocasionado daño oxidativo a biomoléculas como proteínas, ADN y lípidos (Bhatla y Lal, 2018). Dosis elevadas de nanopartículas ocasionan el aumento de ROS y pueden generar toxicidad en la planta (Avestan *et al.*, 2019). Sin embargo, estos compuestos a concentraciones óptimas también sirven como mensajeros, permitiendo la generación de metabolitos secundarios (Juárez-Maldonado, 2023). En nuestros resultados ambas NP en sus dosis más altas (750 mg L⁻¹) incrementaron el contenido de H₂O₂ en el tejido de la flor (Fig. 8C). Sin embargo, también hubo un incremento en la capacidad antioxidante de compuestos hidrófilos y lipófilos en las flores tratadas con las NP de Ca-Si (Fig. 6D y 6E). Se considera como antioxidante al tipo de compuesto que estabiliza la generación de radicales libres (Niki, 2011). Su clasificación se divide en antioxidantes de carácter lipófilo (carotenoides, tocoferoles, fosfolípidos, vitamina K, entre otros) e hidrófilo (fenoles, flavonoides, superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), glutatión peroxidasa (GPx), entre otros) (Haida y Hakiman, 2019). Arora *et al.* (2012) indica que al aplicar concentraciones de 100 mg L⁻¹ de nanopartículas de plata tuvo un incremento en el H₂O₂, pero a 10 mg L⁻¹ indujo respuestas favorables en la germinación de

Brassica juncea, incrementando así el número de hojas, altura y contenido de clorofila, entre otros.

El malondialdehído es un biomarcador de estrés, el cual es utilizado para evaluar la peroxidación lipídica de las membranas (Anjum et al., 2019). Este compuesto se une a biomoléculas como proteínas y ácidos nucleicos, provocando su deterioro. En un primer momento, el incremento de ROS es fundamental para la modificación de proteínas por MDA (Yamauchi et al., 2008). Además, se ha observado que las altas concentraciones de NP se puede inducir la presencia de MDA (Anjum et al., 2019). En los resultados obtenidos, se observó un incremento de MDA en las flores de *Lilium* expuestas a la dosis más alta de las NP2 (Fig. 8D). Sin embargo, en dosis optimas, las nanopartículas pueden reducir el estrés oxidativo en el tejido vegetal. Esto puede atribuirse a las propiedades benéficas del Si, que mejora la capacidad de ajuste osmótico en la raíz mediante el aumento de solutos como la prolina, y el aumento de antioxidantes enzimáticos que reducen el contenido de MDA (Cao et al., 2017). Namjoyan et al. (2020) demostraron que la aplicación nanopartículas de silicio a una concentración de 1 mM en plantas de *Beta vulgaris* disminuyo el contenido de MDA. Sin embargo, a una dosis más alta 2 mM, se observó un incremento de MDA.

6. CONCLUSIÓN

La aplicación de las nanopartículas de calcio y silicio en flores de *Lilium* activó el sistema de defensa antioxidante no enzimático permitiendo mejorar la calidad de las flores. Los resultados mostraron que las NP2-500 mg L⁻¹ fueron las más aptas, ya que lograron aumentar el contenido de antioxidantes como vitamina C en la hoja y flavonoides en la flor, además del contenido de clorofila *a* en la hoja. También se encontró que ambas nanopartículas en concentraciones de 750 mg L⁻¹ provocan un aumento en las ROS y biomarcadores de estrés como el H₂O₂ y MDA. Esta observación sugiere que ambas nanopartículas aumentaron el contenido de las ROS. Sin embargo, para contrarrestar el efecto del estrés oxidativo, se activaron vías metabólicas que incrementan la síntesis de antioxidantes no enzimáticos en las hojas, lo que a su vez ayudó a neutralizar las ROS, impactando positivamente en la vida útil de las flores al protegerlas del daño oxidativo.

7. LITERATURA CITADA

- Abd El-Ghany, M. F., El-Kherbawy, M. I., Abdel-Aal, Y. A., El-Dek, S. I., y El-Baky, T. A. (2021). Comparative study between traditional and nano calcium phosphate fertilizers on growth and production of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants. *Nanomaterials*, 11(11), 2913.
- Alam, P., Arshad, M., Al-Kheraif, A. A., Azzam, M. A., y Balawi, T. (2022). Silicon nanoparticle-Induced regulation of carbohydrate metabolism, photosynthesis, and ROS homeostasis in *Solanum lycopersicum* subjected to salinity stress. *ACS Omega*, 7(36), 31834–31844.
- Aldon, D., Mbengue, M., Mazars, C., y Galaud, J. P. (2018). Calcium signalling in plant biotic interactions. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(3), 665.
- Anjum, N. A., Gill, S. S., Duarte, A. C., y Pereira, E. (2019). Oxidative stress biomarkers and antioxidant defense in plants exposed to metallic nanoparticles. *Nanomaterials and Plant Potential*, 427–439.
- Arora, S., Sharma, P., Kumar, S., Nayan, R., Khanna, P. K., y Zaidi, M. G. H. (2012). Gold-nanoparticle induced enhancement in growth and seed yield of *Brassica juncea*. *Plant Growth Regulation*, 66(3), 303-310.
- Arvouet-Grand A., Vennat B., Pourrat A., y Legret P., 1994. Standardization of propolis extract and identification of principal constituents. *Journal de pharmacie de Belgique*, 49(6), 462-468.
- Avestan, S., Ghasemnezhad, M., Esfahani, M., y Byrt, C. S. (2019). Application of nano-silicon dioxide improves salt stress tolerance in strawberry plants. *Agronomy*, 9(5), 246.
- Bakshi, M., y Kumar, A. (2021). Copper-based nanoparticles in the soil-plant environment: assessing their applications, interactions, fate and toxicity. *Chemosphere*, 281, 130940.

- Behbahani, S. R., Iranbakhsh, A., Ebadi, M., Majd, A., y Ardebili, Z. O. (2020). Red elemental selenium nanoparticles mediated substantial variations in growth, tissue differentiation, metabolism, gene transcription, epigenetic cytosine DNA methylation, and callogenesis in bittermelon (*Momordica charantia*); an *in vitro* experiment. *PLoS one*, 15(7), e0235556.
- Belete, T. (2018). Defense mechanisms of plants to Insect pests: from morphological to biochemical approach. *Trends in Technical y Scientific Research*, 2(2), 555584.
- Bhatla, S. C., y Lal, M. A. (2018). *Plant physiology, development and metabolism*. Springer Nature.
- Boudet, A. M. (2007). Evolution and current status of research in phenolic compounds. *Phytochemistry* 68(22-24), 2722-2735.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., y Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25-30.
- Cao, B. L., Wang, L., Gao, S., Xia, J., y Xu, K. (2017). Silicon-mediated changes in radial hydraulic conductivity and cell wall stability are involved in silicon-induced drought resistance in tomato. *Protoplasma*, 254, 2295-2304.
- Chen, R., Zhang, C., Zhao, Y., Huang, Y., y Liu, Z. (2018). Foliar application with nano-silicon reduced cadmium accumulation in grains by inhibiting cadmium translocation in rice plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 2361–2368.
- Chhipa, H. (2019). Applications of nanotechnology in agriculture. *Methods in Microbiology*, 46, 115-142.
- Cubría-Radío, M., Arrom, L., Puig, S., y Munné-Bosch, S. (2017). Hormonal sensitivity decreases during the progression of flower senescence in *Lilium longiflorum*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 36, 402–412.

- Dangi, A. K., Sharma, B., Khangwal, I., y Shukla, P. (2018). Combinatorial Interactions of biotic and abiotic stresses in plants and their molecular mechanisms: systems biology approach. *Molecular Biotechnology*, 60, 636–650.
- Dasgupta, N., Ranjan, S., y Ramalingam, C. (2017). Applications of nanotechnology in agriculture and water quality management. *Environmental Chemistry Letters*, 15, 591–605.
- Datta, S. K. (2019). Floriculture work at CSIR-National Botanical Research Institute, Lucknow. *Sci Cult*, 85(7–8), 274-283.
- Etesami, H., y Jeong, B. R. (2018). Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 881-896.
- Etesami, H., y Jeong, B. R. (2023). How does silicon help alleviate biotic and abiotic stresses in plants? Mechanisms and future prospects. In *Plant Stress Mitigators*, Academic Press. pp. 359–402.
- Farhangi-Abriz, S., y Torabian, S. (2018). Nano-silicon alters antioxidant activities of soybean seedlings under salt toxicity. *Protoplasma*, 255, 953–962.
- Fellet, G., Pilotto, L., Marchiol, L., y Braidot, E. (2021). Tools for nano-enabled agriculture: fertilizers based on calcium phosphate, silicon, and chitosan nanostructures. *Agronomy*, 11(6), 1239.
- Flores-Pérez, S., Castillo-González, A. M., Valdez-Aguilar, L. A., y Avitia-García, E. (2021). Uso de diferentes proporciones de led rojos y azules para mejorar el crecimiento de *Lilium* spp. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(5), 835-847.
- Francescangeli, N., y Marinangeli, P. (2018). Guía práctica para el cultivo de flores y bulbos de *Lilium*. Ediciones INTA. https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_guia_para_cultivo_lilium.pdf
- Franzoni, G., Cocetta, G., Prinsi, B., Ferrante, A., y Espen, L. (2022). Biostimulants on crops: Their impact under abiotic stress conditions. *Horticulturae*, 8(3), 189.

- García-Velasco, R., y Companioni-González, B. (2018). *Lilium*: situación actual en México. *TECSISTECATL*, 23, 1886-8452. <https://www.eumed.net/rev/tecsistecat/n23/lilium.html>
- Garza-Alonso, C. A., Juárez-Maldonado, A., González-Morales, S., Cabrera-De la Fuente, M., Cadenas-Pliego, G., Morales-Díaz, A. B., y Benavides-Mendoza, A. (2023). ZnO nanoparticles as potential fertilizer and biostimulant for lettuce. *Heliyon*, 9(1), e12787.
- Gómez-Santos, M., González-García, Y., Pérez-Álvarez, M., Cadenas-Pliego, G., y Juárez-Maldonado, A. (2023). Impact of calcium-silicon nanoparticles on flower quality and biochemical characteristics of *Lilium* under salt stress. *Plant Stress*, 10, 100270.
- González-García, Y., González-Moscoso, M., Hernández-Hernández, H., Méndez-López, A., y Juárez-Maldonado, A. (2021). Induction of stress tolerance in crops by applying nanomaterials. In *Nanotechnology in Plant Growth Promotion and Protection: Recent Advances and Impacts*, Jonh Wiley & Sons. pp. 129–169.
- González-García, Y., López-Vargas, E. R., Pérez-Álvarez, M., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., Valdés-Reyna, J., Pérez-Labrada, F., y Juárez-Maldonado, A. (2022). Seed priming with carbon nanomaterials improves the bioactive compounds of tomato plants under saline stress. *Plants*, 11(15), 1984.
- Haida, Z., y Hakiman, M. (2019). A comprehensive review on the determination of enzymatic assay and nonenzymatic antioxidant activities. *Food Science and Nutrition*, 7(5), 1555–1563.
- Hao, S., Wang, Y., Yan, Y., Liu, Y., Wang, J., y Chen, S. (2021). A review on plant responses to salt stress and their mechanisms of salt resistance. *Horticulturae*, 7(6), 132.
- Herreros, D. L. M. (1983). Cultivo de *Lilium* (Azucena híbrida). Servicio de extensión agraria Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España, 28.

- Hung, C. Y., y Yen, G. C. (2002). Antioxidant activity of phenolic compounds isolated from *Mesona procumbens* Hemsl. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(10), 2993-2997.
- Husen, A. (2020). Introduction and techniques in nanomaterials formulation. In: Husen A., Jawaid M (eds). *Nanomaterials for Agriculture and Forestry Applications*, Elsevier Inc. pp. 1-14.
- Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14.
- Juárez-Maldonado, A. (2023). Influence of Nanomaterials on Non-enzymatic Antioxidant Defense Activities in Plants. In: Al-Khayri, J.M., Alnaddaf, L.M., Jain, S.M (eds). *Nanomaterial Interactions with Plant Cellular Mechanisms and Macromolecules and Agricultural Implications*, Springer, Cham. pp. 73–298.
- Juárez-Maldonado, A., Ortega-Ortíz, H., Morales-Díaz, A. B., González-Morales, S., Morelos-Moreno, Á., Cabrera-De la Fuente, M., Sandoval-Rangel, A., Cadenas-Pliego, G., y Benavides-Mendoza, A. (2019). Nanoparticles and nanomaterials as plant biostimulants. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(1), 162.
- Kah, M. (2015). Nanopesticides and nanofertilizers: emerging contaminants or opportunities for risk mitigation? *Frontiers in Chemistry*, 3, 64.
- Kamle, M., Mahato, D. K., Devi, S., Soni, R., Tripathi, V., Mishra, A. K., y Kumar, P. (2020). Nanotechnological interventions for plant health improvement and sustainable agriculture. *3 Biotech*, 10, 168.
- Khan, M. N., Mobin, M., Abbas, Z. K., AlMutairi, K. A., y Siddiqui, Z. H. (2017). Role of nanomaterials in plants under challenging environments. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 194–209.
- Krause, M. R., De Sousa Santos, M. N., Moreira, K. F., Tolentino, M. M., y Mapeli, A. M. (2021). Extension of the vase life of *Lilium pumilum* cut flowers by pulsing solution containing sucrose, citric acid and silver thiosulfate. *Ornamental Horticulture*, 27, 344–350.

- Kumari, S., Kumar, S., Singh, C. P., y Dhami, V. (2017). Effect of pre harvest treatment on flower quality and vase life of Asiatic *Lilium* cv. Arcachon. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 6, 2969–2974.
- Liu, B., Soundararajan, P., y Manivannan, A. (2019). Mechanisms of silicon-mediated amelioration of salt stress in plants. Plants, 8, 307.
- Lu, N., Wu, L., y Shi, M. (2020). Selenium enhances the vase life of *Lilium longiflorum* cut flower by regulating postharvest physiological characteristics. Scientia Horticulturae, 264, 109172.
- Marslin, G., Sheeba, C. J., y Franklin, G. (2017). Nanoparticles alter secondary metabolism in plants via ROS burst. Frontiers in Plant Science, 8, 832.
- Meir, S., y Philosoph Hadas, S. (2021). Postharvest physiology of ornamentals: processes and their regulation. Agronomy, 12, 2387.
- Mohammadbagheri, L., y Naderi, D. (2017). Effect of growth medium and calcium nano-fertilizer on quality and some characteristics of gerbera cut flower. Journal of Ornamental Plants, 7(3), 205-213.
- Mukhopadhyay, S. S. (2014). Nanotechnology in agriculture: Prospects and constraints. Nanotechnology, Science and Applications, 7(2), 63–71.
- Nagata, M. y Yamashita, I. (1992). Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. Nippon Shokuhin kogyo Gakkaishi, 39(10), 925–928.
- Namjoyan, S., Sorooshzadeh, A., Rajabi, A., y Aghaalikhani, M. (2020). Nano-silicon protects sugar beet plants against water deficit stress by improving the antioxidant systems and compatible solutes. Acta Physiologiae Plantarum, 42, 157.
- Niki, E. (2011). Antioxidant capacity: which capacity and how to assess it? Journal of Berry Research, 1(4), 169-176.

- Nonato-Castillo, J., Carrillo-Arteaga, A. N. J., y Iglesias-Piña, D. (2018). The origin and shaping of a floricultural region in estado de mexico. *International Journal of Social Science and Economic Research*, 3, 2455-8834.
- Orozco-Hernández, M. E. (2007). Entre la competitividad local y la competitividad global: floricultura comercial en el Estado de México. *Convergencia*, 14(45), 111-160.
- Paciolla, C., Fortunato, S., Dipierro, N., Paradiso, A., de Leonardis, S., Mastropasqua, L., y de Pinto, M. C. (2019). Vitamin C in plants: from functions to biofortification. *Antioxidants*, 8(11), 519.
- Panpatte, D. G., Jhala, Y. G., Shelat, H. N., y Vyas, R. v. (2016). Nanoparticles: The next generation technology for sustainable agriculture. In *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity*, Springer Cham. pp. 289–300.
- Phogat, N., Khan, S. A., Shankar, S., Ansary, A. A., y Uddin, I. (2016). Fate of inorganic nanoparticles in agriculture. *Advanced Materials Letters*, 7(1), 3–12.
- Prasad, R. (2019). *Nanotechnology in the life science*. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16383-9_3
- Prasad, R., Kumar, V., y Kumar, M. (2017). *Nanotechnology: Food and environmental paradigm*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4678-0>
- Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C., y Biswas, P. (2018). Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: current state and future perspectives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26), 6487–6503.
- Ramírez-Hernández, J. J., Avitia-Rodríguez, J. A., y Urbina, E. (2017). Mexican floriculture at the dawn of the twenty-first century: Its position and dynamism in international markets. XVI International Business y Economy Conference (IBEC)-Chile.
- Ranjbar, S., Rahemi, M., y Ramezani, A. (2018). Comparison of nano-calcium and calcium chloride spray on postharvest quality and cell wall enzymes activity in apple cv. Red Delicious. *Scientia Horticulturae*, 240, 57–64.

- Rastogi, A., Tripathi, D. K., Yadav, S., Chauhan, D. K., Živčák, M., Ghorbanpour, M., El-Sheery, N. I., y Brestic, M. (2019). Application of silicon nanoparticles in agriculture. *3 Biotech*, 9, 90.
- Sahari Moghadam, A., y Seyed Nasir, S. (2020). Evaluation of the effect of different potassium concentrations in nutrient solution on growth and postharvest life of lily flowers (*Lilium spp.*) in hydroponic cultivation. *Journal of Ornamental Plants*, 10(4), 253-262.
- Salachna, P., Byczyńska, A., Zawadzińska, A., Piechocki, R., y 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>
- Sánchez-Alvear, D. (2005). Influencia de conservadores químicos en la vida en florero de flores de liris (*Lilium ssp.*) (Tesis de maestría). UAAAN, Buenavista Saltillo, Coah.
- Sánchez-Navarro, J. F., González-García, Y., Benavides-Mendoza, A., Morales-Díaz, A. B., González-Morales, S., Cadenas-Pliego, G., García-Guillermo, M. D. S., y Juárez-Maldonado, A. (2021). Silicon nanoparticles improve the shelf life and antioxidant status of *Lilium*. *Plants*, 10(11), 2338.
- Sarraf, M., Vishwakarma, K., Kumar, V., Arif, N., Das, S., Johnson, R., Janeeshma, E., Puthur, J. T., Aliniaiefard, S., Chauhan, D. K., Fujita, M., y Hasanuzzaman, M. (2022). Metal/metalloid-based nanomaterials for plant abiotic stress tolerance: an overview of the mechanisms. *Plants*, 11(3), 316.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018). El lirium; una flor llena de historia y significados. <https://www.gob.mx/siap/articulos/el-lirium-una-flor-llena-de-historia-y-significados?idiom=es>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). Brochure flores mayo 2022. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/724288/10_de_mayo_2022.pdf

- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). Las flores están en el campo, en las miradas, en las palabras... <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/las-flores-estan-en-el-campo-en-las-miradas-en-las-palabras>
- Shahcheraghi, N., Golchin, H., Sadri, Z., Tabari, Y., Borhanifar, F., y Makani, S. (2022). Nano-biotechnology, an applicable approach for sustainable future. 3 Biotech, 12(3), 65.
- Shang, Y., Hasan, M. K., Ahammed, G. J., Li, M., Yin, H., y Zhou, J. (2019). Applications of nanotechnology in plant growth and crop protection: a review. Molecules, 24(14), 2558.
- Sharif, M., Rahman, M. A., Ahmed, B., Abbas, R. Z., y Hassan, F. (2020). Copper nanoparticles as growth promoter, antioxidant and anti-bacterial agents in poultry nutrition: prospects and future implications. Biological Trace Element Research, 199, 3825-3836.
- Sistema de información Agroalimentaria de Consulta (SIACON). (2022). Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>
- Spricigo, P. C., Pilon, L., Trento, J. P., de Moura, M. R., Bonfim, K. S., Mitsuyuki, M. C., Mattoso, L. H. C., y Ferreira, M. D. (2021). Nano-chitosan as an antimicrobial agent in preservative solutions for cut flowers. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 96(8), 2168–2175.
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. Plant and Soil, 15(2), 134-154.
- Taiz, L., y Zeiger, E. (2006). Plant Physiology (3rd ed., Vol.2). Sinauer Associates. Pag. 656.
- Tak, H., Negi, S., Gupta, A., y Ganapathi, T. R. (2018). A stress associated NAC transcription factor MpSNAC67 from banana (*Musa × paradisiaca*) is involved in regulation of chlorophyll catabolic pathway. Plant Physiology and Biochemistry, 132, 61–71.

- Thor, K. (2019). Calcium—nutrient and messenger. *Frontiers in Plant Science*, 10, 449564.
- Tofighi-Alikhani, T., Tabatabaei, S. J., Mohammadi-Torkashvand, A., Khalighi, A., y Talei, D. (2021). Effects of silica nanoparticles and calcium chelate on the morphological, physiological and biochemical characteristics of gerbera (*Gerbera jamesonii* L.) under hydroponic condition. *Journal of Plant Nutrition*, 44(7), 1039-1053.
- Upadhyaya, H., Begum, L., Dey, B., Nath, PK., y Panda SK. (2017). Impact of calcium phosphate nanoparticles on rice plant. *Journal of Plant Science and Phytopathology*, 1(1), 001-010.
- Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., Rehman, H. ur, Ashraf, I., y Sanaullah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Science of the Total Environment*, 721, 137778.
- Velikova, V., Yordanov, I., y Edreva, A. (2000). Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants. *Plant Science*, 151, 59–66.
- Yamauchi, Y., Furutera, A., Seki, K., Toyoda, Y., Tanaka, K., y Sugimoto, Y. (2008). Malondialdehyde generated from peroxidized linolenic acid causes protein modification in heat-stressed plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 46(8-9), 786–793.
- Yan, G. C., Nikolic, M., Ye, M. J., Xiao, Z. X., y Liang, Y. C. (2018). Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(10), 2138-2150.
- Yu, Z., y Dahlgren, R. A. (2000). Polyphenols in Conifer Foliage. *Journal of Chemical Ecology*, 26(9), 2119-21.
- Zhao, L., Lu, L., Wang, A., Zhang, H., Huang, M., Wu, H., Xing, B., Wang, Z., y Ji, R. (2020). Nano-Biotechnology in Agriculture: Use of Nanomaterials to Promote Plant Growth and Stress Tolerance. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(7), 1935–1947.