

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Efecto de las Nanopartículas de Silicio en Plantas de Maíz (*Zea mays* L.)
Cultivadas en Invernadero

Por:

JESSICA ALEJANDRA VILLANUEVA ZAMBRANO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Efecto de las Nanopartículas de Silicio en Plantas de Maíz (*Zea mays* L.)
Cultivadas en Invernadero

Por:

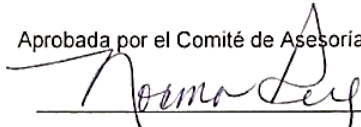
JESSICA ALEJANDRA VILLANUEVA ZAMBRANO

TESIS


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

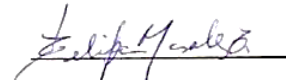
Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dra. Norma Angélica Ruiz Torres
Asesor Principal



Dra. Keana Vera Reyes
Coasesor



Dra. Felipa Morales Luna
Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México
Diciembre, 2024

Carta de no plagio

Por medio del presente documento yo Jessica Alejandra Villanueva Zambrano, hago constar que la tesis titulada "Efecto de las Nanopartículas de Silicio en Plantas de Maíz (*Zea mays* L.) Cultivadas en Invernadero", ha sido desarrollada de mi trabajo personal, en el cual no he utilizado datos, artículos, cuadros, o gráficas de otros trabajos.

Así mismo dejo constancia que las citas de otros autores han sido identificadas en el trabajo, por lo cual no han sido asumidas como propias.

Atentamente



Jessica Alejandra Villanueva Zambrano

DEDICATORIA

Con todo mi amor y gratitud, dedico este logro a mi querida mamá, **Ma. Gloria Zambrano Ramírez**. Gracias por apoyar cada uno de mis sueños, respaldar mis decisiones, y por acompañarme en cada paso de este largo camino. Sin ti, todo habría sido mucho más difícil. Te agradezco profundamente por haber creído en mí y recordarme constantemente lo capaz que soy. Aprecio cada sacrificio y esfuerzo que haces por nuestra familia. Gracias por haberme formado como persona de bien y por tu amor incondicional. Espero de todo corazón que este logro lo sientas como el tuyo propio.

A mi papá, **Jesús Villanueva Laguna**, te dedico esta meta que significa tanto para mí, gracias por confiar en este sueño desde el primer día, apoyándome y creyendo en mí. Sin tu confianza y tu ayuda esto habría sido aún más difícil. Te agradezco por tu constante apoyo.

A mi hermana **Alma Delia Villanueva Zambrano**, quien siempre ha estado a mi lado y es mi compañera de vida. Estoy profundamente agradecida por la confianza que siempre has depositado en mí. Tu apoyo constante me ha dado fuerzas para seguir persiguiendo cada una de mis metas. Me emociona saber lo orgullosa que te sientes de mí, y quiero que sepas que este logro es tuyo también. La distancia que nos separó valió la pena, porque hoy este éxito lo comparto contigo, te amo hermana.

A mi hermanito **Carlos Daniel Villanueva Zambrano**, te dedico este logro con todo mi corazón, porque quiero que te sientas orgulloso de todo lo que he alcanzado. Gracias por ser parte tan importante en este camino. Quiero que sepas que estarás en corazón toda la vida.

A mi querido abuelito **J. Guadalupe Saturnino Villanueva García**, papá, quiero que sepas que este logro te lo dedico con todo mi amor. Desde que era una niña, has sido la persona que ha moldeado mi vida y me ha enseñado a ser una persona de bien. Gracias por siempre arroparme y por darnos a mis hermanos y a mí todo tu cariño. Admiro profundamente la persona que eres, tan sabio, tan inteligente, y con una pasión inquebrantable por aprender. Por todo esto, eres mi mayor inspiración. Me siento tan afortunada de tenerte en mi vida, y deseo

que te enorgullezcas aún más de mí y de todo lo que he logrado. Con amor y profundo agradecimiento para ti, **papá Gualo**.

A mi abuelita **Juana Laguna Solís (†)**, mamá Juana este logro es para ti, que desde el cielo me sigues guiando, sé que tu amor y tu protección siempre me acompañan. Aunque desearía que estuvieras aquí para que compartiéramos juntas la alegría de alcanzar esta meta tan significativa en mi vida, sé que me acompañas en espíritu y me cuidas desde donde estas. Te llevaré en mi corazón siempre.

A mis abuelitos **Margarita Ramírez Ayala y Raymundo Zambrano Reyes**, les dedico este logro con todo mi cariño, porque sin duda han sido parte fundamental de inspiración en mi vida. Gracias por haber influido de manera tan positiva en mi camino y por haberme brindado siempre su amor y apoyo incondicional en cada momento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a **Dios** que me permitió realizar mis estudios de manera satisfactoria.

Quiero expresar mi más sentido agradecimiento a la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN)**, mi Alma Mater. Durante todo mi tiempo como estudiante, esta universidad fue mi segundo hogar. Desde el primer día me abrió sus puertas y me brindó las herramientas necesarias para mi formación académica y personal. Siempre estaré profundamente agradecida por darme la oportunidad de formar parte de los **BUITRES** de la Narro.

A la **Dra. Norma Angélica Ruiz Torres**, quien fue mi asesora a lo largo de este trabajo. Agradezco la oportunidad de haber trabajado junto a una persona tan experimentada y sabia, cuya pasión por el estudio y el conocimiento ha sido una constante fuente de inspiración para mí. Gracias por su valiosa guía y brindarme generosamente su tiempo, lo cual fue fundamental para la culminación de esta investigación.

Les agradezco a todos los profesores que estuvieron involucrados en formación académica, por su dedicación, enseñanza y apoyo a lo largo de este proceso.

Quiero finalizar este agradecimiento reconociendo a una persona muy especial para mí, **José Armando Pelagio Ríos**. A lo largo de esta etapa, ha sido mi compañero incondicional, siempre a mi lado desde el primer día, su apoyo constante, su motivación y su confianza en mí hicieron que el camino fuera mucho más llevadero. Gracias por estar presente en cada momento y por hacer que todo comenzara aquel día en el arco, donde empezó lo más bonito de esta experiencia, te quiero.

RESUMEN

Esta investigación se llevó a cabo en un invernadero correspondiente al departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, el bioensayo se realizó con el fin de determinar el efecto de las nanopartículas de silicio (NPsSiO) para determinar su efecto en plantas de maíz (*Zea mays* L.), bajo condiciones de invernadero. Durante este trabajo se evaluaron variables agronómicas y fisiológicas.

Se utilizaron bolsas de polietileno negro con una capacidad de 5 L, las cuales se llenaron de una mezcla homogénea de vermiculita y perlita 60:40 (V:V), en las macetas se colocaron 2 semillas de maíz al centro de la bolsa y se distribuyeron en una cama sin espacio entre ellas.

Se evaluaron (0, 12.5, 25, 37.5 y 50 ppm), los cuales tuvieron 8 repeticiones cada uno.

En cuanto a la nutrición de las plantas se utilizó la solución nutritiva Hoagland la cual se aplicó 2 veces por semana.

El trabajo se estableció en un diseño completamente al azar, utilizando NPsSiO en la nutrición a las plantas. Las variables de interés evaluadas fueron altura de planta, número de hojas, contenido de clorofila en la base de la hoja, contenido de clorofila de la parte media de la hoja, contenido de clorofila del ápice de la hoja, ancho del tallo, delgado del tallo, longitud de raíz, peso seco del tallo, peso seco de raíz. Para el analizar los datos se utilizó un análisis de varianza, comparación de medias y coeficientes de variación con la prueba Tukey ($P \leq 0.05$), con el programa SAS versión 9.3

En las variables altura de planta, número de hojas por tallo, y ancho de tallo, el testigo superó estadísticamente al resto de los tratamientos.

Hubo correlaciones positivas y significativas entre algunas variables, dejando ver la relación entre la altura de planta con el número de hojas, el peso seco del tallo, y el peso seco de la raíz. También se observaron correlaciones positivas y significativas entre el número de hojas por tallo y el peso seco de tallo, además con el peso seco de la raíz.

El contenido de clorofila en la base de la hoja presentó una correlación positiva y significativa con la variable contenido de clorofila de la parte media de la hoja. Asimismo, se observó correlación positiva entre la variable contenido de clorofila de la parte media de la hoja y el contenido de clorofila del ápice de la hoja.

Se obtuvo también, una correlación significativa positiva entre el peso seco del tallo y el peso seco de la raíz.

ÍNDICE DE CONTENIDO GENERAL

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO GENERAL	ix
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
1. Objetivo general	3
1.2 Objetivo específico	3
1.3 Hipótesis	3
III. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1 Funciones del silicio en la planta	4
3.2 Síntomas por deficiencia de silicio	6
3.3 Nanotecnología	6
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	9
4.1 Localización	9
4.2 Descripción del material genético	9
4.3 Preparación del sustrato	10
4.4 Siembra y manejo nutricional	10
4.5 Plagas y enfermedades	13
V. VARIABLES EVALUADAS	13
5.1 Número de hojas por planta	13
5.2 Altura de planta	13
5.3 Contenido de clorofila de la base, parte media y del ápice de la hoja	13
5.4 Ancho y delgado del tallo	13
5.5 Largo de raíz	14
5.6 Peso seco de tallo y de raíz	14
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
VII. CONCLUSIONES	22
VIII. RECOMENDACIONES	23
VI. LITERATURA CITADA	24

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Dosis utilizada para cada uno de los tratamientos.....	12
Cuadro 2. Macronutrientes utilizados para la solución nutritiva para el riego diario.....	12
Cuadro 3. Micronutrientes utilizados para la solución nutritiva para el riego diario.....	12
Cuadro 4. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plántulas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) con tratamientos de NPsSiO, bajo condiciones de invernadero.	16
Cuadro 5. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plántulas de maíz (<i>Zea mays</i> L.), tratadas con NPsSiO, bajo condiciones de invernadero.	16
Cuadro 6. Comparación de medias del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plántulas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) con tratamientos de NPsSiO, bajo condiciones de invernadero.	18
Cuadro 7. Comparación de medias del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plántulas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) con tratamientos de NPsSiO, bajo condiciones de invernadero.	19
Cuadro 8. Coeficientes de correlación de Pearson para variables agronómicas evaluadas en maíz (<i>Zea mays</i> L.) con tratamientos de NPsSiO, bajo condiciones de invernadero.	21

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la UAAAN donde se llevó a cabo el experimento.	9
Figura 2. Híbrido de maíz Rx-715.	10
Figura 3. Preparación del sustrato para llevar a cabo la siembra	10
Figura 4. Primer riego de forma manual después de la siembra.....	11
Figura 5. Peso de macro y de micronutrientes, para la preparación de la solución nutritiva.....	11
Figura 6. Riego manual con agua, solución nutritiva y NPsSiO.....	11
Figura 7. Medición de clorofila con el SPAD 502.....	13
Figura 8. Medición con Vernier del ancho y delgado del tallo.....	14
Figura 9. Corte del tallo con navaja y colocación en bolsas de papel de estraza.....	14
Figura 10. Limpieza de raíz para eliminar el sustrato adherido.....	14
Figura 11. Limpieza de la raíz con ayuda de una criba para eliminar el residuo de sustrato.....	15

I. INTRODUCCIÓN

México es el centro del origen y diversidad del maíz (*Zea mays* L.), es uno de los granos alimenticios más antiguos que se conocen, es parte íntegra de nuestra identidad. Pertenece a la familia de las Poáceas (Gramíneas). Posee además un fuerte contenido de diversidad por razones sociales, económicas y culturales.

Fue el primer cereal a ser sometido a rápidas e importantes transformaciones tecnológicas en su forma de cultivo. Hoy en día el maíz es el segundo cultivo del mundo por su producción, después del trigo, mientras que el arroz ocupa el tercer lugar. Es el primer cereal en rendimiento de grano por hectárea y es el segundo, después del trigo, en producción total. El maíz es de gran importancia económica a nivel mundial, ya sea como alimento humano, como alimento para el ganado o como fuente de un gran número de productos industriales. La diversidad de los ambientes bajo los cuales es cultivado es mucho mayor que la de cualquier otra especie. Es un cereal que tiene la capacidad de adaptarse y crecer en climas totalmente diversos. Los principales Estados productores son Sinaloa (22%), Jalisco (14%), México (8%), Michoacán (7%), Guanajuato (6%), Guerrero (5%), Veracruz (5%), Chiapas (5%), Chihuahua (4%), Puebla (4%), y el resto de los Estados representan el 20% restante.

La creciente población mundial demanda alimentos y otros insumos, por lo cual el mayor desafío que enfrentan los investigadores agrícolas es innovar y generar tecnología para producir la cantidad y la calidad de comida suficiente para alimentar a la creciente población mundial, pero sin degradar la salud del suelo y de los agroecosistemas.

La aplicación de la nanotecnología (NT) en la agricultura y en la industria de alimentos también está recibiendo atención en la actualidad. Las inversiones en agricultura y alimentación nanotecnológica van en aumento debido a sus beneficios potenciales, los cuales incluyen desde la mejora en la calidad e inocuidad de los insumos agrícolas, hasta un mejor procesamiento y mayor valor nutricional de los mismos.

El uso de nanopartículas (NPs) en diferentes cultivos ha evidenciado que incrementan el porcentaje de germinación y el crecimiento de plántulas, además

de su actividad fisiológica. Intervienen en la expresión de los genes y en el nivel bioquímico de proteínas y enzimas en las plantas, indicando eso su potencial para mejorar de manera sustentable el rendimiento de cultivos agrícolas.

Después del oxígeno, el silicio (Si) es el elemento más abundante en la corteza terrestre y es un componente de la mayoría de los minerales. En la solución del suelo, el silicio está presente principalmente como ácido silícico monomérico (H_4SiO_4), que es también la forma en que lo absorben las plantas.

Asimismo, la mayor resistencia a las enfermedades se atribuye a la acumulación de Si en el sistema epidérmico. Para infectar eficazmente la planta, el patógeno debe atravesar algunas barreras físicas, como la cutícula y la epidermis. La capa de Si que se forma debajo de la cutícula proporciona otra barrera física contra los patógenos y fortalece la planta. El Si endurece el tejido vegetal, lo que dificulta que las plagas se alimenten e introduzcan sus piezas bucales.

Además del mecanismo físico, el Si activa las enzimas de defensa de las plantas e induce la formación y acumulación de compuestos que suprimen enfermedades, como los compuestos fenólicos y las fitoalexinas.

En este trabajo de investigación se estudió el efecto de las NPsSiO en la acumulación de materia seca en plantas de maíz, cultivadas en invernadero.

II. OBJETIVOS

1. Objetivo general

- Evaluar la respuesta de variables agronómicas y fisiológicas en maíz, a la aplicación al sustrato de diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de silicio (NPsSiO).

1.2 Objetivo específico

- Medir el efecto de la aplicación de diferentes concentraciones de NPsSiO en variables relacionadas con el crecimiento de las plantas.
- Determinar el efecto de las NPsSiO en el contenido de clorofila (verdor de la planta), peso seco del tallo y de la raíz.

1.3 Hipótesis

- H_i Las NPsSiO no mejoran la expresión de variables agronómicas y fisiológicas en las plantas de maíz.
- H_0 = Las NPsSiO mejoran la expresión de variables agronómicas y fisiológicas en plantas de maíz.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Funciones del silicio en la planta.

El silicio (Si) después del oxígeno, es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre (Ma, 2004). Es un elemento común en rocas y suelos, aunque no es esencial para las plantas, la mayoría de los cultivos acumulan una cantidad significativa (Tubaña y Heckman, 2015).

En el año 2005 fue aceptado como un elemento esencial para las plantas superiores (Epstein *et al.*, 1853; Epstein, 1999). El Si es uno de los oligoelementos más importantes para la salud humana (Martin, 2013), también desempeña un papel crucial en la salud de las plantas, particularmente en el alivio del estrés ambiental. En los últimos años, la investigación se ha esforzado por comprender el efecto del Si en la mitigación de estrés biótico y abiótico (Etesami *et al.*, 2018; Luyckx *et al.*, 2017; Meena *et al.*, 2014). Investigaciones indican que el uso del Si en la agricultura puede mejorar la productividad de los cultivos, la asimilación de nutrientes esenciales, y aumentar la tolerancia a diversos tipos de estrés causados por factores abióticos (Amin *et al.*, 2018; Tubaña *et al.*, 2016). Como el estrés por sequía, altas temperaturas, heladas, deficiencia o toxicidad mineral, salinidad, el daño por radiación y el desequilibrio de nutrientes (Malhotra and Kapoor, 2019) y también a condiciones adversas de carácter biótico, como las enfermedades y las plagas (Bakhat *et al.*, 2018).

El mecanismo de absorción del Si varía aparentemente de la presencia de transportadores específicos de este elemento (Kaur y Greger, 2019). Incluso en condiciones en las que el Si es abundante y disponible para las plantas, su capacidad para acumular silicio varía mucho de una especie a otra, e incluso de un genotipo a otro, dentro de la misma especie (Greger *et al.*, 2018; Yamaji *et al.*, 2007; Nable *et al.*, 1990).

La acumulación de Si en los brotes oscila entre 0.1% y 10% de Si en peso seco, por lo cual estas plantas se pueden categorizar como acumuladoras y en un rango menor de 0.5% se conocen como no acumuladoras (Ma y Takahashi, 2002).

El Si es un elemento con múltiples beneficios, ya que puede mejorar las condiciones del suelo y la absorción de nutrientes en las plantas (Zargar *et al.*,

2019). Puede también aumentar la absorción de Ca y K en las hojas de maíz bajo estrés abiótico (Kaya *et al.*, 2006).

Bolan *et al.* (2003) mencionan que el silicio reduce la absorción de metales pesados que se encuentran en el suelo, los cuales se ven favorecidos por un pH bajo.

El Si influye en las relaciones hídricas en las plantas tratadas con sequía: induce la formación de una doble capa de cutícula de Si debajo de la epidermis de la hoja que reduce las pérdidas de agua a través de la transpiración cuticular (Gong *et al.*, 2003). El Si también reduce la conductancia estomática en relación con la pérdida de turgencia de las células protectoras resultante de la deposición de Si y las propiedades modificadas de la pared celular (Zhu y Gong, 2014). La mejora de la resistencia a la sequía con Si igualmente puede atribuirse a una gran capacidad para extraer agua del suelo como consecuencia de la promoción de alargamiento de las raíces relacionada con el Si (Hattori *et al.*, 2005).

La absorción de Si por parte de las plantas se produce principalmente en forma de ácido silícico (H_4SiO_4) o ácido monosilícico $Si(OH)_4$ soluble en agua, que sigue pasivamente el flujo de agua desde la superficie lo que depende tanto de las raíces como de la composición química del suelo (Bakhat *et al.*, 2018).

El Si es transportado desde las raíces hasta los tejidos foliares de la planta donde se acumula en la epidermis de hojas y tallos. Esta acumulación no es tóxica para la planta, ya que en exceso este elemento tiene la propiedad de polimerizarse (Ma *et al.*, 2001), es decir autorregularse, formando fitolitos dentro de la pared celular, lo cual le otorga mayor estructura y rigidez y una mejor exposición de la hoja a la luz del sol para así estimular la fotosíntesis (Kaufman *et al.*, 1979). Takahashi (2002) menciona que, la fertilización con minerales ricos en silicio aumenta la disponibilidad del fósforo en un 40 a 60%, por lo que en este sentido una aplicación de fertilizantes a base de silicio es casi que obligatoria para una agricultura altamente eficiente en términos de aprovechamiento de recursos.

La fertilización mineral con Si tiene un doble efecto en el sistema suelo-planta. La nutrición con silicio al cultivo refuerza en la planta su capacidad de almacenamiento y distribución de carbohidratos requeridos para el crecimiento y producción de cosecha, la autoprotección contra enfermedades causadas por

hongos y bacterias, el ataque de insectos y ácaros y de las condiciones desfavorables de clima, al estimular el desarrollo y actividad de estructuras poliméricas en la cutícula, los tricomas y fitolitos en la superficie de las hojas (Quero *et al.*, 2008).

La capa de fitolitos debajo de la epidermis vegetal permite aumentar la resistencia mecánica a la penetración física de insectos plagas y hongos fitopatógenos (Menzies *et al.*, 1991; Dann *et al.*, 2002). En algunas gramíneas el espesor de esta capa puede llegar a medir hasta 2.5 micrómetros (μm) de espesor (Yoshida *et al.*, 1962), la cual, de acuerdo con (Takanashi, 2002) funciona como barrera protectora y termina por afectar el aparato bucal de los insectos plaga.

Según Liang *et al.* (2013), el Si mejora la resistencia al acame fortaleciendo la base del tallo en el arroz. También mejora la tolerancia a los rayos UV debido al efecto protector de los cuerpos de deposición de Si en la epidermis de la hoja (Goto *et al.*, 2003). O al reducir los daños a la membrana inducidos por los UVB (Shen *et al.*, 2010).

3.2 Síntomas por deficiencia de silicio

En arroz, la deficiencia de silicio ocasiona un retraso generalizado en el desarrollo, se incrementa la transpiración y las hojas más antiguas mueren, en tomate, la deficiencia de silicio reduce el desarrollo y las hojas nuevas presentan deformaciones y muchas plantas no dan frutos (Salisbury *et al.*, 1992).

3.3 Nanotecnología

La nanotecnología (NT) ha surgido como un avance tecnológico-científico que puede transformar sectores de la agricultura proporcionando herramientas novedosas para la detección molecular de estrés biótico y abiótico, así como para la detección rápida de enfermedades fitopatógenas y el mejoramiento en la capacidad de las plantas para absorber el agua, los nutrientes y los pesticidas (Khot *et al.*, 2012; Nuruzzaman *et al.*, 2016). Además de esto, la nanobiotecnología también puede mejorar nuestra comprensión de la biología de los cultivos y, por lo tanto, potencialmente puede mejorar sus rendimientos o valores nutricionales (Fraceto *et al.*, 2016).

La NT también ofrece una gran oportunidad en la industria agro-alimenticia moderna, aunque no se debe perder de vista que también puede generar algunos riesgos debido a la incorporación de nanocompuestos o nanopartículas en el ambiente y los alimentos, ya que eso causa problemas en la salud y calidad de los alimentos (Handford *et al.*, 2014).

Entre los avances de la NT para la agricultura se pueden destacar los siguientes: encapsulamiento de ingredientes activos como fertilizantes, herbicidas, fungicidas, insecticidas y nutrientes, los cuales se pueden incorporar en matrices de liberación lenta o controlada (Lateef *et al.*, 2016). El uso de la NT en la agricultura está ganando importancia porque contribuye a desarrollar nuevas estrategias sostenibles. Por ejemplo, se pueden diseñar nanomateriales para inmovilizar nutrientes o liberarlos de manera controlada en el suelo (Fraceto *et al.*, 2016).

Dentro del sector agrícola se han realizado diversos experimentos para conocer el tamaño óptimo, forma y concentración de las NPs para que sean aplicadas a las plantas tratando de mejorar su penetración y translocación vascular por los haces vasculares del xilema y floema (Da Costa *et al.*, 2016; Ebbs *et al.*, 2016). Se ha demostrado que la encapsulación de los ingredientes activos en NPs aumenta la eficacia de sus ingredientes químicos, ya que permiten reducir su volatilización, lixiviación y se puede reducir la toxicidad y contaminación de los agroecosistemas usando estos nanoproductos (Cota *et al.*, 2013).

Las aplicaciones foliares y mediante el sistema de riego de las diversas NPs puede provocar fitotoxicidad, así como afectar el suelo y el agua por su bioacumulación, por lo que se debe tener en cuenta cuales son las dosis óptimas y frecuencia de aplicación en los cultivos.

El tamaño de las NPs está directamente relacionado con su absorción, es un parámetro crucial que permite su entrada a través de los poros de la pared celular o de los estomas de las plantas. Además, el tamaño determina sus procesos de transporte posteriores en las células (es decir, plasmodesmos) u orgánulos de células vegetales, lo que afecta su acumulación, toxicidad y cinética de transporte a las células vegetales (Tripathi *et al.*, 2017)

Las NPs también están siendo empleadas como antimicrobiales para el control de enfermedades de plantas, como promotores de germinación y crecimiento vegetal, así como nanofertilizantes (Liu *et al.*, 2015).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Localización

El experimento se realizó en el periodo primavera-verano del 2023, en el invernadero No. 2 del Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, localizada en la Calzada Antonio Narro #1923 en Buenavista, Saltillo, Coahuila. Con coordenadas 25° 21' 5" latitud norte, 101° 1' 52" longitud oeste y una altitud de 1742 msnm.



Figura 1. Ubicación de la UAAAN donde se llevó a cabo el experimento.

4.2 Descripción del material genético

Se utilizó semilla de maíz (*Zea mays* L.) del híbrido RX-715, que cuenta con alto potencial para elote amarillo con calidad de grano, hoja y silo, por su precocidad es ideal para el cierre de siembras y temporal en la región norte.



Figura 2. Híbrido de maíz Rx-715.

4.3 Preparación del sustrato

Se utilizaron macetas de polietileno negro de 5 L de capacidad, las cuales fueron llenadas con una mezcla humedecida de vermiculita y perlita 60:40 (V/V). Posteriormente, se distribuyeron en una cama con 8 plantas (macetas) por concentración, sin distancia entre plantas.



Figura 3. Preparación del sustrato para llevar a cabo la siembra

4.4 Siembra y manejo nutricional

La siembra se realizó en invernadero, colocando 2 semillas en el centro por maceta, una vez germinadas se seleccionó la mejor plántula, para evitar la competencia de nutrientes dejando solo la que mostró mejor desarrollo.

Se procedió a dar el primer riego con agua potable para mantener la humedad del cultivo.



Figura 4. Primer riego de forma manual después de la siembra.

Para la nutrición de las plantas se utilizó la solución nutritiva de Hoagland. Se evaluaron cinco tratamientos de nanopartículas de óxido de silicio (NPsSiO), el testigo con 0 ppm, 12.5 ppm, 25 ppm, 37.5 ppm y 50 ppm. Diariamente se aplicaron 400 mL de agua potable al sustrato por planta. A los seis días después de la siembra se aplicó la solución nutritiva con 200 mL por planta (tres veces por semana) y 200 mL de agua potable (diariamente). Nueve días después de la siembra se aplicó 100 mL de NPsSiO por planta, con una frecuencia de 2 veces por semana. Se incrementó la dosis de agua potable dependiendo las necesidades de la planta, y por motivos de la alta temperatura dentro del invernadero, se aumentó la dosis de agua potable a 300 mL por riego, ligado a que el sustrato no retenía humedad, mientras que la solución nutritiva y la dosis de las NPsSiO se mantuvo hasta el final del experimento.



Figura 6. Peso de macro y de micronutrientes, para la preparación de la solución nutritiva.



Figura 5. Riego manual con agua, solución nutritiva y NPsSiO.

Cuadro 1. Dosis utilizada para cada uno de los tratamientos

Tratamientos	NPsSiO ppm	NPsSiO (mg L ⁻¹)
T1	0.0	0.0
T2	12.5	0.0102
T3	25.0	0.0205
T4	37.5	0.03075
T5	50.0	0.041

Cuadro 2. Macronutrientes utilizados para la solución nutritiva para el riego diario.

Macronutrientes	Concentración g/L	ml/L de agua
KNO ₃	101.1	24
Ca (NO ₃) ₂ 4H ₂ O	236.1	16
NH ₄ H ₂ PO ₄	115.08	8
MgSO ₄ 7H ₂ O	246.49	4

Cuadro 3. Micronutrientes utilizados para la solución nutritiva para el riego diario.

Micronutrientes	Concentración g/L	ml/L de agua
KCl	1.864	1
H ₃ BO ₃	0.773	1
MnSO ₄ H ₂ O	0.169	1
ZnSO ₄ 7H ₂ O	0.288	1
CuSO ₄ 5H ₂ O	0.062	1
H ₂ MoO ₄	0.040	1
NaFeO ₂	30	1

4.5 Plagas y enfermedades

Durante el desarrollo del cultivo dentro del invernadero no se presentaron incidencias de plagas, el monitoreo se realizó diariamente para corroborar que no hubiera presencia de algún factor que interrumpiera el crecimiento de las plántulas.

V. VARIABLES EVALUADAS

5.1 Número de hojas por planta

Se realizó el conteo a partir de la primera hasta la última hoja verdadera de cada una de las repeticiones de cada tratamiento.

5.2 Altura de planta

Con una regla milimétrica se midió desde la base del tallo hasta la parte superior de cada una de las repeticiones.

5.3 Contenido de clorofila de la base, parte media y del ápice de la hoja

Con un medidor de clorofila (SPAD 502 Minolta), se hicieron tres determinaciones en la hoja No. 5 de cada planta (repetición), la primera lectura en la base de la hoja, la segunda en la parte media y la tercera en el ápice.



Figura 7. Medición de clorofila con el SPAD 502.

5.4 Ancho y delgado del tallo

Se realizó con la ayuda de un Vernier en cada repetición (planta).



Figura 8. Medición con Vernier del ancho y delgado del tallo.

5.5 Largo de raíz

Para facilitar el trabajo de medición de raíz, se omitió el riego un día antes para evitar que el sustrato tuviera demasiada humedad y a la vez adherido en la raíz. Se hizo un corte en cada maceta para poder extraer la raíz, sacudiendo hasta que estuviera lo más limpia posible. Se midió la raíz primaria con una regla milimétrica desde la base del tallo hasta el ápice.



Figura 9. Corte del tallo con navaja y colocación en bolsas de papel de estraza.



Figura 10. Limpieza de raíz para eliminar el sustrato adherido.

5.6 Peso seco de tallo y de raíz

Una vez terminada la toma de datos, con una navaja se cortó el tallo desde la base y este se colocó en bolsas de papel de estraza, previamente identificadas por tratamiento y repetición.

Las bolsas de papel de estraza con los tallos y las raíces se llevaron a un asoleadero del Departamento de Fitomejoramiento, se colocaron abiertas para un secado rápido y uniforme por dos semanas.

Una vez secas las plantas, los tallos se colocaron en charolas para pesarlas en una balanza semianalítica, y en el caso de las raíces se utilizó primero una criba para poder quitar el sustrato que pudo haber quedado atrapado entre las raíces, una vez totalmente limpias se colocaron de igual forma en una charola para pesar la raíz de cada uno de los tratamientos.



Figura 11. Limpieza de la raíz con ayuda de una criba para eliminar el residuo de sustrato.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza para las variables agronómicas evaluadas bajo condiciones de invernadero (Cuadros 4 y 5), se encontraron diferencias significativas con un valor de $P \leq 0.05$ en las variables altura de planta (AltPlanta), ancho del tallo (ATallo), longitud de raíz (LRaíz) y peso seco de raíz (PsRaíz). Asimismo, se registraron diferencias significativas con $P \leq 0.01$ en la variable número de hojas (NHojas).

Cuadro 4. Cuadros medios del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plántulas de maíz (*Zea mays* L.) con tratamientos de NPsSiO, bajo condiciones de invernadero.

F.V.	G.L.	AltPlanta (cm)	NHojas	CCBHoja	CCMHoja	CCÁpHoja
Tratamiento	4	57.11*	1.08**	49.11NS	31.89NS	44.66NS
Error	35	17.40	0.25	65.50	62.48	56.41
C.V (%)		23.47	9.70	30.55	24.19	21.38

**= Significativos ($P \leq 0.01$); *= Significativos ($P \leq 0.05$); NS= No hay significancia, F.V.=Fuentes de variación, G.L.= Grados libertad, AltPlanta= Altura de planta, NHojas= Número de hojas, CCBHoja=Contenido de clorofila en la base de la hoja, CCMHoja=Contenido de clorofila de la parte media de la hoja, CCÁpHoja=Contenido de clorofila del ápice de la hoja, C.V.= Coeficiente de variación.

Cuadro 5. Cuadros medios del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plántulas de maíz (*Zea mays* L.), tratadas con NPsSiO, bajo condiciones de invernadero.

F.V	G.L.	ATallo (mm)	DTallo (mm)	LRaíz (cm)	PsTallo (g)	PsRaíz (g)
Tratamiento	4	27.09*	13.23NS	77.75*	7.13NS	3.40*
Error	35	9.05	5.96	53.79	3.08	1.19
C.V (%)		18.71	21.44	11.96	42.25	32.19

**= Significativos ($P \leq 0.01$); *= Significativos ($P \leq 0.05$), NS= No hay significancia, F.V.=Fuente de variación, G.L.= Grados libertad, DATallo= Ancho del tallo, DDTallo= Delgado del tallo, LRaíz= Longitud de raíz, PsTallo= Peso seco del tallo, PsRaíz= Peso seco de raíz C.V.= Coeficiente de variación.

En el Cuadro 6 se presentan las comparaciones de medias para las variables agronómicas evaluadas bajo condiciones de invernadero, evidenciándose diferencias significativas en las variables altura de planta (AltPlanta) y número de hojas por planta (NHojas).

El testigo (0 ppm) mostró una AltPlanta de 22.12 cm, superior en comparación con los demás tratamientos. Al incrementar la dosis a 25 ppm, la altura se redujo a 14.90 cm. Aunque se aumentó la dosis a 50 ppm, la altura alcanzó solo 17.00 cm, sin superar la del testigo. Estos datos sugieren la presencia de un efecto de toxicidad en las plantas a medida que se incrementó la concentración de NPsSiO.

Ya con otras NPs se han documentado efectos fitotóxicos asociados con las nanopartículas, ej. las de cobre (NPsCu), así como estudios sobre su absorción, acumulación, distribución y los efectos fisiológicos y bioquímicos que ejercen en diversas especies vegetales (De la Rosa *et al.*, 2017; Tripathi *et al.*, 2017).

El testigo (0 ppm) presentó un número de hojas (NHojas) de 5.75, el valor más alto entre los tratamientos. Al incrementar la dosis a 25 ppm, se observó una disminución a 4.75. A pesar de que 50 ppm representó la mayor concentración aplicada, no superó el rendimiento del testigo, reflejando el mismo efecto de fitotoxicidad al incrementar la concentración de los tratamientos.

Tomando como ejemplo la respuesta a la aplicación de otras NPs, en un estudio adicional, se demostró que la aplicación foliar de nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) a una concentración de 500 ppm en maíz (*Zea mays L.*), resultó en un aumento significativo de la altura de planta, lo cual se correlaciona con un mayor número de hojas, así como con un incremento en el rendimiento tanto de planta como de mazorca (Satdev *et al.*, 2020).

En las variables CCBHoja, CCMHoja y CCÁpHoja no se observaron diferencias significativas, lo que indica que el contenido de clorofila se mantuvo constante en cada segmento. Por lo tanto, las NPsSiO parecen afectar en mayor medida la altura de planta (AltPlanta) y el número de hojas (NHojas), y no el verdor de las hojas.

Considerando el efecto de otras NPs, Satdev et al. (2020) reportaron que la aplicación foliar de NPsZnO a una concentración de 500 ppm en plantas de maíz (*Zea mays* L.), mejoró considerablemente algunas variables fisiológicas, entre ellas la altura de planta.

Prasad et al. (2012) reportaron que las NPsZnO incrementaron significativamente la longitud de la raíz de plantas de maíz.

Por otro parte, Uresti Durán (2016) encontró que la longitud de planta, la biomasa aérea y el peso seco de raíz de plantas tratadas con NPsZnO, TiO₂ o Fe₂O₃ no presentaron diferencias significativas, comparadas con el tratamiento testigo.

En un estudio realizado por Bao-Shan et al. (2004), reportaron que, durante el desarrollo de sus estudios, las raíces de las plántulas fueron sometidas a un tratamiento en soluciones de silicio nanoestructurado; sin embargo, no se proporcionaron detalles sobre las dimensiones ni la morfología del material utilizado. La administración de 500 µL de silicio por litro en el tratamiento resultó en un aumento estadísticamente significativo en parámetros morfológicos, incluyendo la altura, la longitud de la raíz principal, el diámetro radicular y la cantidad de raíces laterales.

Cuadro 6. Comparación de medias del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plántulas de maíz (*Zea mays* L.) con tratamientos de NPsSiO, bajo condiciones de invernadero.

Tratamiento (ppm)	AltPlanta (cm)	NHojas	CCBHoja	CCMHoja	CCÁpHoja
Testigo	22.12 a	5.75 a	27.68 a	33.48 a	33.51 a
12.5	16.91 ab	5.00 b	22.31 a	29.55 a	36.01 a
25	14.90 b	4.75 b	27.27 a	35.01 a	38.48 a
37.5	17.92 ab	5.12 ab	26.43 a	32.81 a	32.36 a
50	17.00 ab	5.12 ab	28.73 a	32.47 a	35.21 a
\bar{x}	17.77	5.15	26.49	32.66	35.11
Tukey	5.99	0.71	11.63	11.36	10.79

VARIABLES con literales diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes, AltPlanta= Altura de la planta, NHojas= Número de hojas, CCBHoja=Contenido de clorofila en la base de la hoja, CCMHoja= Contenido de clorofila de la parte media de la hoja, CCÁpHoja= contenido de clorofila del ápice de la hoja.

Investigaciones previas realizadas por Suriyaprabha *et al.* (2012), han evaluado el impacto de las nanopartículas de silicio en cultivos de maíz (*Zea mays* L.), llevando a cabo una comparación entre NPsSiO (20-40 nm, según microscopía electrónica de transmisión, TEM) y tratamientos con silicio a granel en el crecimiento de maíz. Los datos obtenidos mostraron que el nanotratamiento resultó en un crecimiento significativamente mejorado y una mayor acumulación de silicio en las plántulas.

Cuadro 7. Comparación de medias del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plántulas de maíz (*Zea mays* L.) con tratamientos de NPsSiO, bajo condiciones de invernadero.

Tratamiento (ppm)	ATallo (mm)	DTallo (mm)	LRaíz (cm)	PsTallo (g)	PsRaíz (g)
Testigo	18.16 a	10.87 a	61.50 a	5.82 a	4.27 a
12.5	17.60 ab	12.48 a	66.12 a	3.65 a	3.88 a
25.0	15.86 ab	9.81 a	57.43 a	3.75 a	2.77 a
37.5	13.63 b	10.83 a	60.58 a	3.96 a	2.91 a
50.0	15.13 ab	12.92 a	60.93 a	3.58 a	3.13 a
\bar{x}	16.08	11.38	61.31	4.15	3.39
Tukey	4.32	3.51	10.54	2.52	1.58

Variables con literales diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes, ATallo= Ancho del tallo, DTallo= Delgado del tallo, LRaíz= Longitud de raíz, PsTallo= Peso seco del tallo, PsRaíz= Peso seco de raíz.

En el Cuadro 7 se indica que para la variable ancho del tallo (ATallo) se observaron diferencias significativas. El testigo (0 ppm) presentó un diámetro estadísticamente superior de 18.16 mm en comparación con el tratamiento de 12.5 ppm, que alcanzó 17.60 mm, observándose otra vez el efecto de toxicidad al incrementar la concentración de las NPsSiO. El resto de las variables no mostraron diferencias significativas entre tratamientos.

En el Cuadro 8 se presentan los coeficientes de correlación de Pearson, en donde la variable altura de planta está relacionada significativamente con las variables número de hojas ($r=0.8254^{**}$), peso seco del tallo ($r=0.8227^{**}$) y peso seco de raíz ($r=0.6575^{**}$).

La variable número de hojas solo presentó correlación con el peso seco del tallo ($r=0.6593^{**}$) y con la variable peso seco de raíz ($r=0.4754^{**}$), por el contrario, las variables contenido de clorofila en la base de la hoja, contenido de clorofila en la parte media de la hoja, contenido de clorofila del ápice de la hoja, ancho del tallo, delgado del tallo y longitud de raíz no presentaron correlación con el número de hojas.

El contenido de clorofila en la base de la hoja mostró un par de correlaciones con las variables contenido de clorofila en la parte media de la hoja ($r=0.5718^{**}$), así como el contenido de clorofila del ápice de la hoja ($r=0.3830^{*}$); en cambio, las variables restantes no presentaron correlaciones significativas con la variable contenido de clorofila en la base de la hoja.

Se mostró una correlación positiva significativa entre la variable contenido de clorofila en la parte media de la hoja con contenido de clorofila del ápice de la hoja ($r=0.6263^{**}$); lo que indica que para las demás variables no hubo correlación con el contenido de clorofila en la parte media de la hoja.

Respecto a la variable contenido de clorofila en el ápice de la hoja mostró correlación significativa con el diámetro del ancho del tallo ($r=0.0439$); las variables restantes como delgado del tallo, longitud de raíz, peso seco de tallo y peso seco de raíz no presentaron correlación significativa con la variable contenido de clorofila en el ápice de la hoja.

Así mismo la variable ancho del tallo solo tuvo correlación con el peso seco de raíz ($r=0.3357^{*}$), indicando que el resto de las variables no manifestaron correlación con la variable ancho del tallo.

Respecto a las variables, delgado del tallo y longitud de raíz no presentaron correlaciones significativas con longitud de raíz, peso seco de tallo y peso seco de raíz respectivamente.

Por último, en la variable peso seco de tallo se observó correlación positiva con la variable peso seco de raíz ($r=0.8095^{**}$).

Cuadro 8. Coeficientes de correlación de Pearson para variables agronómicas evaluadas en maíz (*Zea mays L.*) con tratamientos de NPsSiO, bajo condiciones de invernadero.

Variables	NHojas	CCBHoja	CCMHoja	CCÁpHoja	ATallo (mm)	DTallo (mm)	LRaíz (cm)	PsTallo (g)	PsRaíz (g)
AltPlanta (cm)	0.8254**	-0.0520 ^{NS}	0.1944 ^{NS}	0.0964 ^{NS}	0.0400 ^{NS}	0.0278 ^{NS}	0.0753 ^{NS}	0.8227**	0.6575**
NHojas		-0.0384 ^{NS}	0.1889 ^{NS}	-0.0351 ^{NS}	0.2588 ^{NS}	0.1430 ^{NS}	-0.0908 ^{NS}	0.6593**	0.4754**
CCBHoja			0.5718**	0.3830*	0.0274 ^{NS}	-0.1285 ^{NS}	0.0037 ^{NS}	-0.1945 ^{NS}	-0.1281 ^{NS}
CCMHoja				0.6263**	0.0158 ^{NS}	-0.0968 ^{NS}	0.1609 ^{NS}	0.1027 ^{NS}	0.0507 ^{NS}
CCÁpHoja					0.0439*	-0.0862 ^{NS}	0.1644 ^{NS}	0.0947 ^{NS}	0.1706 ^{NS}
ATallo (mm)						0.1753 ^{NS}	-0.0820 ^{NS}	0.1065 ^{NS}	0.3357*
DTallo (mm)							0.2559 ^{NS}	-0.0641 ^{NS}	0.0705 ^{NS}
LRaíz (cm)								-0.0309 ^{NS}	0.1606 ^{NS}
PsTallo (g)									0.8095**

**= Significativos ($P \leq 0.01$); *= Significativos ($P \leq 0.05$), NS= No hay significancia, AltPlanta= Altura de planta, NHojas= Número de hojas, CCBHoja=Contenido de clorofila en la base de la hoja, CCMHoja=Contenido de clorofila de la parte media de la hoja, CCÁpHoja=Contenido de clorofila del ápice de la hoja, DATallo= Ancho del tallo, DTallo= Delgado del tallo, LRaíz= Longitud de raíz, PsTallo= Peso seco del tallo, PsRaíz= Peso seco de raíz.

VII. CONCLUSIONES

En plantas de maíz, la aplicación de nanopartículas de silicio (NPsSiO) al sustrato, mostró en general una respuesta de fitotoxicidad.

En las variables altura de planta, número de hojas por tallo, y ancho de tallo, el testigo superó estadísticamente al resto de los tratamientos.

Hubo correlaciones positivas y significativas entre algunas variables, dejando ver la relación entre la altura de planta con el número de hojas, el peso seco del tallo, y el peso seco de la raíz.

Correlaciones positivas y significativas se observaron entre el número de hojas por tallo y el peso seco de tallo, además con el peso seco de la raíz.

El contenido de clorofila en la base de la hoja presentó una correlación positiva y significativa con la variable contenido de clorofila de la parte media de la hoja. Asimismo, se observó correlación positiva entre la variable contenido de clorofila de la parte media de la hoja y el contenido de clorofila del ápice de la hoja.

Se obtuvo también, una correlación significativa positiva entre el peso seco del tallo y el peso seco de la raíz.

Los resultados sugieren que las NPsSiO influyen de manera sustancial en el desarrollo de las plantas, aunque el efecto varía en función de la concentración utilizada.

VIII. RECOMENDACIONES

Los resultados sugieren que el tratamiento testigo superó a los demás tratamientos en las variables evaluadas, lo que indica que, para futuras investigaciones con nanopartículas de silicio (NPsSiO), se recomienda aplicar concentraciones inferiores a 12.5 ppm con menos frecuencia en cuanto al riego. Actualmente, la literatura sobre el efecto de las NPsSiO en variables como el número de hojas y el ancho del tallo es limitada. Por lo tanto, se sugiere la realización de estudios adicionales que profundicen en el impacto de las NPsSiO sobre estos aspectos, para comprender mejor su influencia en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

VI. LITERATURA CITADA

- Amin, M., Ahmad, R., Ali, A., Hussain, I., Mahmood, R., Aslam, M., and Lee, D. J. (2018). Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. *Silicon*, 10(2), 177-183.
- Bakhat, H. F., Bibi, N., Zia, Z., Abbas, S., Hammad, H. M., Fahad, S., Ashraf, M. R., Shah, G. M., Rabbani, F., and Saeed, S. (2018). Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: A review. *Crop Protection*, 104, 21-34.
- Bao-Shan, L., Shao-Qi, D., Chun-Hui, L., Li-Jun, F., Shu-Chun, Q., Y., and Min, Y. (2004). Effect of TMS (nanostructured silicon dioxide) on growth of Changbai larch seedlings. *Journal of Forestry Research*, 15, 138-140.
- Bolan, N. S., Adriano, D. C., and Curtin, D. (2003). Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. *Advances in Agronomy*, 78, 5–272.
- Cota, O., Cortez, M., Burgos, A., Ezquerro, J., and Plascencia, M. (2013). Controlled release matrices and micro/nanoparticles of chitosan with antimicrobial potential: Development of new strategies for microbial control in agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(7), 1525-1536.
- Da Costa, M., and Sharma, P. (2016). Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa*. *Photosynthetica*, 54(1), 110-119.
- Dann, E., and Muir, S. (2002). Peas grown in media with elevated plant-available silicon levels have higher activities of chitinases and B-1, 3-glucanase, are less susceptible to a fungal leaf spot pathogen and accumulate more foliar silicon. *Australasian Plant Pathology*, 31, 9-13.
- De la Rosa, G., García-Castañeda, C., Vázquez-Núñez, E., Alonso-Castro, Á. J., Basurto-Islas, G., Mendoza, Á., Molina, C. (2017). Physiological and biochemical response of plants to engineered NMs: Implications on future design. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 226-235.

- Ebbs, S., Bradfield, S., Kumar, P., White, J., Musante, C., and Ma, X. (2016). Accumulation of zinc, copper, or cerium in carrot (*Daucus carota*) exposed to metal oxide nanoparticles and metal ions. *Environmental Science: Nano*, 3(1), 114-126.
- Epstein, E. (1999). Silicon. *Annual Review of Plant Biology*, 50(1), 641-664.
- Epstein, E., and Bloom, A. J. (1983). *Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives*. Sinauer.
- Etesami, H., and Jeong, B. R. (2018). Silicon (Si): Review and prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stress in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 881-896.
- Fraceto, L. F., Grillo, R., de Medeiros, G. A., Scognamiglio, V., Rea, G., and Bartolucci, C. (2016). Nanotechnology in agriculture: Which innovation potential does it have? *Frontiers in Environmental Science*, 4(20), 1-5.
- Gong, H. J., Chen, K. M., Chen, G. C., Wang, S. M., and Zhang, C. L. (2003). Effects of silicon on growth of wheat under drought. *Journal of Plant Nutrition*, 26, 1055-1063.
- Goto, M., Ehara, H., Karita, S., Takabe, K., Ogawa, N., and Yamada, Y. (2003). Protective effect of silicon on phenolic biosynthesis and ultraviolet spectral stress in rice crops. *Plant Science*, 164, 349-356.
- Greger, M., Landberg, T., and Vaculík, M. (2018). Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. *Plants*, 7 (2), 41.
- Handford, C., Dean, M., Henchion, M., Spence, M., Elliott, C., and Campbell, K. (2014). Implications of nanotechnology for the agri-food industry: Opportunities, benefits and risks. *Trends in Food Science and Technology*, 40(2), 226-241.
- Hattori, T., Inanaga, S., Araki, H., An, P., Morita, S., and Luxava, M. (2005). The application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiologia Plantarum*, 123, 459-466.

- Kaufman, P., Takeoka, Y., Carlson, T., Bigelow, W., Jones, J., Moore, P., and Ghosheh, N. (1979). Studies on silica deposition in sugarcane using scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray analysis, neutron activation analysis and light microscopy. *Phytomorphology*, 29, 185-193.
- Kaur, H., and Greger, M. (2019). A review on Si uptake and transport system. *Plants*, 8(4), 81.
- Kaya, C., Tuna, L., and Higgs, D. (2006). Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 29(8), 1469-1480.
- Khot, L., Sankaran, S., Maja, J., Ehsani, R., and Schuster, E. (2012). Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: A review. *Crop Protection*, 35, 64-70.
- Lateef, A., Nazir, R., Jamil, N., Alam, S., Shah, R., Khan, M., and Saleem, M. (2016). Synthesis and characterization of zeolite-based nano-composite: An environmentally friendly slow-release fertilizer. *Microporous and Mesoporous Materials*, 232, 174-183.
- Liang, S. J., Li, Z. Q., Li, X. J., Xie, H. G., Zhu, R. S., Lin, J. X. (2013). Efectos de las características estructurales del tallo y el contenido de silicio sobre la resistencia al acame en arroz (*Oryza sativa* L.). *Res. Cultivos*, 14, 621-636.
- Liu, R., and Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic production. *Science of the Total Environment*, 514, 131-139.
- Luyckx, M., Hausman, J. F., Lutts, S., and Guerriero, G. (2017). Silicon and plants: Current knowledge and technological perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 8, 256009.
- Ma, J. F. (2004). Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50(1), 11-18.
- Ma, J. F., and Takahashi, E. (2002). *Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan*. Elsevier.

- Ma, J. F., Miyake, Y., and Takahashi, E. (2001). Silicon as a beneficial element for crop plants. In L. E. Datnoff, G. H. Snyder, and G. H. Korndorfer (Eds.), *Silicon in agriculture* (pp. 17-40). Elsevier.
- Malhotra, C., and Kapoor, R. T. (2019). Silicon: A sustainable tool in abiotic stress tolerance in plants. In M. Hasanuzzaman, K. Hakeem, K. Nahar, and H. Alharby (Eds.), *Plant abiotic stress tolerance* (pp. 333-356). Springer.
- Martin, K. (2013). *Interrelations between essential metal ions and human diseases*. Springer.
- Meena, V. D., Dotaniya, M. L., Coumar, V., Rajendiran, S., Kundu, S., and Subba Rao, A. (2014). A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 84, 505-518.
- Menzies, J., Ehret, D., Glass, A., and Samuels, A. (1991). The influence of silicon on cytological interactions between *Sphaerotheca fuliginea* and *Cucumis sativus*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 39, 403-414.
- Nable, R. O., Lance, R. C., and Cartwright, B. (1990). Uptake of boron and silicon by barley genotypes with differing susceptibility to boron toxicity. *Annals of Botany*, 66(1), 83-90.
- Nuruzzaman, M., Rahman, M., Liu, Y., and Naidu, R. (2016). Nanoencapsulation, nano-guard for pesticides: A new window for safe application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(7), 1447-1483.
- Prasad, T. N. V. K. V., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Reddy, K. R. Y., and Pradeep, T. (2012). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanuts. *Journal of Plant Nutrition*, 35(6), 905-927.
- Quero, E. (2008). La biosilificación: Proceso biológico fundamental en la productividad vegetal. *Revista de Riego: Protección y Nutrición de Hortalizas y Frutas*, 6(39), 72-76.
- Salisbury, F. B., and Ross, C. W. (1992). *Plant physiology* (4th ed.). Wadsworth Publishing.

- Satdev, V. J., Chavda, B. N., and Saini, L. K. (2020). Effect of nano ZnO on growth and yield of sweet corn under South Gujarat conditions. *International Journal of Current Science*, 8(1).
- Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Eneji, A. E., and Li, J. (2010). Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. *Journal of Plant Physiology*, 167, 1248-1252.
- Suriyaprabha, R., Karunakaran, G., Yuvakkumar, R., Prabu, P., Rajendran, V., and Kannan, N. (2012). Growth and physiological responses of maize (*Zea mays* L.) to porous silica nanoparticles in soil. *Journal of Nanoparticle Research*, 14, 1-14.
- Takahashi, E. (2002). *Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan*. Elsevier.
- Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, S., Pandey, R., Singh, V. P., Sharma, N. C., and Chauhan, D. K. (2017). An overview of manufactured nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 2-12.
- Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, V. Prasad, S. M., Dubey, N. K., and Chauhan, D. K. (2017). Silicon nanoparticles alleviate UV-B stress more effectively than silicon in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 70-81.
- Tubaña, B. S., and Heckman, J. R. (2015). Silicon in soils and plants. In *Silicon and plant diseases* (pp. 7-51). Springer.
- Tubaña, B. S., Babu, T., and Datnoff, L. E. (2016). A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture. *Soil Science*, 181(9/10), 393-411.
- Uresti Durán, N. D. (2016). *Efecto de nanopartículas de ZnO, TiO₂ y Fe₂O₃ en el crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz* (Tesis de maestría, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo).
- Yamaji, N., and Ma, J. F. (2007). Spatial distribution and temporal variation of the rice silicon transporter Lsi1. *Plant Physiology*, 143(3), 1306-1313.

- Yoshida, S., Ohnishi, Y., and Kitagishi, K. (1962). Chemical forms, mobility, and deposition of silicon in the rice plant. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 8, 107-111.
- Zargar, S. M., Mahajan, R., Bhat, J. A., Nazir, M., and Deshmukh, R. (2019). Role of silicon in plant stress tolerance: Opportunities to achieve a sustainable cropping system. *3 Biotech*, 9(3), 73.
- Zhu, Y., and Gong, H. (2014). Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 455-472.