

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



Evaluación de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en la germinación de semillas de chile piquín (*Capsicum annuum* var. *Glabriusculum*) sometidas a estrés osmótico.

POR:

DANIELA HERNÁNDEZ LICEA

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Evaluación de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en la germinación de semillas de chile piquín (*Capsicum annuum* var. *Glabriusculum*) sometidas a estrés osmótico.

Por:

DANIELA HERNÁNDEZ LICEA

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

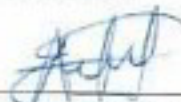
INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el comité de asesoría:



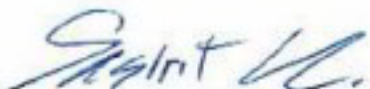
M.C. Eteberto Cortez Quevedo

Asesor Principal Interno



Dr. Arturo Isaías Martínez Enríquez

Asesor Principal Externo



Dra. Sasirot Khamkure

Coasesor



Dr. Pedro Pérez Rodríguez

Vocal suplente

Saltillo, Coahuila, México

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Evaluación de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en la germinación de semillas de chile piquín (*Capsicum annuum* var. *Glabriusculum*) sometidas a estrés osmótico

Por:

DANIELA HERNÁNDEZ LICEA

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

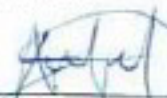
INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el jurado examinador:



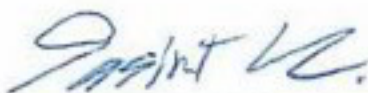
M.C. Etelberto Cortez Quevedo

Asesor Principal Interno



Dr. Arturo Isaias Martínez Enriquez

Asesor Principal Externo



Dra. Sasirot Khamkure

Coasesor



Dr. Pedro Pérez Rodríguez

Vocal suplente



M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Buenvista, Saltillo Coahuila, México



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 presentarlas como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por 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.

Pasante

A handwritten signature in blue ink, consisting of a vertical line with a horizontal stroke crossing it, positioned above a horizontal line.

Daniela Hernández Licea

1. AGRADECIMIENTOS

A Dios, por todas las bendiciones que me ha dado. Por ser mi luz en esas noches de desvelo y siempre escuchar mis plegarias. Por siempre cuidar de mí y mi familia todo el tiempo que estuve fuera de casa y permitirme regresar a ella.

A mi Alma Terra Mater, La Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por abrirme las puertas y convertirse en mi segundo hogar y permitirme ser parte de la gran familia Buitre.

Al Departamento de Ciencias del Suelo, por brindarme un espacio de trabajo y materiales para que este proyecto se llevara a cabo.

Al M.C. Etelberto Cortez Quevedo, a quien admiro y respeto, por brindarme su tiempo, conocimiento, paciencia y siempre orientarme en cada duda. Su dedicación fue clave para que este trabajo alcanzara los estándares esperados.

A mis profesores, quienes contribuyeron de manera significativa en mi formación profesional. Gracias por compartir sus conocimientos, experiencias, consejos y enseñanzas.

A mis amigos, Lisa Soe Pérez Guzmán, Carlos Rodríguez Cárdenas, María Fernanda Torres García, Michel Subialdea, quienes siempre me apoyaron en este proyecto, nunca me dejaron sola, y siempre tuvieron palabras de aliento cuando algo se complicaba. Por todas y cada una de las vivencias que compartimos y por permitirme ser parte de sus vidas.

2. DEDICATORIAS

A mis padres, Ma. Del Rocio Licea de la Vega y Miguel Ángel Hernández Rodríguez, por ser mi pilar más fuerte, por su amor incondicional, por su apoyo incansable, por enseñarme que el esfuerzo y la perseverancia siempre dan frutos, por siempre ponerme entre sus rezos y nunca dejarme sola, este logro es tan mío, como suyo.

“Honra a tu padre y a tu madre, para que tengas una larga vida en la tierra que el Señor tu Dios, te da.”

(Éxodo 20:12)

A mis hermanos, Andrea Noemí y Kevin Miguel, mis compañeros de vida, por acompañarme siempre en el camino y recordarme con su cariño que nunca estoy sola.

Al amor de mi vida, José Rubén Guerrero Cano, por ser mi compañero, mi cómplice y mi refugio en días de incertidumbre. Gracias por creer en mí, incluso cuando yo dudé. “Puedes con todo, pero no con todo a la vez”.

3. ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIAS.....	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iii
ÍNDICE DE CUADROS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
RESUMEN.....	vi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	2
3. OBJETIVOS.....	3
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
4. HIPÓTESIS.....	4
5. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
5.1. ORIGEN Y DISTRIBUCIÓN DEL CHILE PIQUÍN.....	5
5.2. PRODUCCIÓN DE CHILE PIQUÍN EN MÉXICO.....	6
5.3. IMPORTANCIA ECONÓMICA.....	7
5.4. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA.....	7
5.5. MORFOLOGÍA DEL CHILE PIQUÍN.....	8
5.6. GERMINACIÓN DEL CHILE PIQUÍN.....	9
5.7. ESTRÉS ABIÓTICO EN LA AGRICULTURA.....	9
5.7.1. Estrés osmótico.....	10
5.7.2. Estrés salino.....	11
5.8. NANOTECNOLOGÍA EN LA AGRICULTURA.....	13
5.8.1. Nanofertilizantes.....	15
5.8.2. Nanobioestimulantes.....	16
5.9. NANOPARTÍCULAS DE CALCIO.....	18
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20

6.1.	UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO.....	20
6.2.	SÍNTESIS DE LAS NANOPARTÍCULAS.....	20
6.3.	ESTABLECIMIENTO DEL EXPERIMENTO.....	20
	6.3.1. Material vegetal.....	20
	6.3.2. Siembra.....	20
	6.3.3. Riego.....	21
	6.3.4. Diseño experimental y de tratamientos.....	21
	6.3.5. Tratamientos y su aplicación.....	21
6.4.	REGISTRO DE DATOS Y VARIABLES DE ESTUDIO.....	22
	6.4.1. Variables en la germinación de semilla de chile piquín.....	22
	6.4.2. Variables agronómicas.....	24
6.5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	25
7.	RESULTADOS.....	26
7.1.	VARIABLES EN LA GERMINACIÓN DE CHILE PIQUÍN.....	26
	7.1.1. Porcentaje de germinación.....	26
	7.1.2. Otros parámetros en la germinación de chile piquín.....	28
7.2.	VARIABLES AGRONÓMICAS DE CHILE PIQUÍN.....	31
	7.2.1. Peso seco total.....	33
	7.2.2. Otros parámetros en plántulas de chile piquín.....	35
8.	CONCLUSIONES.....	38
9.	LITERATURA CITADA.....	39

4. ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación del chile <i>Capsicum annuum</i> var. <i>glabriusculum</i> de acuerdo a su nombre común, forma y su geografía dentro de la república mexicana (Laborde y Pozo 1982; Long et al., 1999).....	8
Cuadro 2. Descripción de los tratamientos aplicados en la germinación de chile piquín sometidas a estrés osmótico.	21
Cuadro 3. Resultados del efecto de la aplicación de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en la germinación de semillas de chile piquín sometidas a estrés osmótico.	29
Cuadro 4. Resultados de las variables número de raíces secundarias y número de plántulas anormales de la aplicación de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en la germinación de semillas de chile piquín sometidas a estrés osmótico.....	32
Cuadro 5. Resultados de las variables diámetro de plántula, peso fresco por plántula, peso fresco total, longitud de raíz y altura de plántula de la aplicación de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en la germinación de semillas de chile piquín sometidas a estrés osmótico.....	36

5. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución del chile piquín en la república mexicana. Elaboración propia.	6
Figura 2. Potencial de soluto en dos sistemas acuosos con una membrana semipermeable.....	11
Figura 3. Efecto de las nanopartículas al estrés por salinidad.....	13
Figura 4. Efecto de la aplicación de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en la germinación de semillas de chile piquín sometidas a estrés osmótico.	26
Figura 5. Efecto de la aplicación de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en el peso seco total de plántulas de chile piquín sometidas a estrés osmótico... ..	34

6. RESUMEN

El estrés hídrico en México y el mundo es uno de los factores más determinantes en cuanto a la producción agrícola, por lo que es necesario desarrollar estrategias que mitiguen esta problemática. Esta investigación tuvo como objetivo la evaluación del efecto de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en la germinación de semillas de chile piquín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) sometidas a estrés osmótico, se utilizó un diseño completamente al azar con 15 tratamientos y tres repeticiones. Se utilizaron dosis de NPs de carbonato de calcio y sulfato de calcio a concentraciones de 100 y 250 mg/L y el estrés osmótico se aplicó con el uso de polietilenglicol (PEG-1500) a -0.5 y -0.3 bar. Se evaluaron parámetros en la germinación como porcentaje de germinación (PG), porcentaje de germinación relativo (PRG), tiempo medio de germinación (TMG), tasa de germinación (TG) y velocidad de germinación (VG) y en plántula se midieron variables como diámetro de plántula (DP), peso seco total (PST), peso fresco, longitud de raíz (LR), altura de plántula (AP), número de plántulas anormales y número de raíces secundarias. Los resultados mostraron que el porcentaje de germinación en condiciones de estrés indica la mejora sobre todo con las nanopartículas de sulfato de calcio a 250 mg/L y el peso seco de plántula mostró un efecto positivo al combinar las NPs de carbonato y sulfato de calcio con estrés de osmótico de -0.5 bar. Por tanto, se concluye que la aplicación de nanopartículas de calcio utilizadas mejoran el estrés moderado en la germinación de plántulas de chile piquín.

Palabras clave: nanopartículas, estrés osmótico, estrés hídrico, chile piquín.

1. INTRODUCCIÓN

La fertilidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes son factores críticos que influyen en la germinación y el crecimiento de las plantas, especialmente en condiciones de estrés ambiental (Ma *et al.*, 2016). En los últimos años, el uso de nanopartículas (NPs) en la agricultura ha ganado relevancia debido a su potencial para mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes y mitigar los efectos del estrés abiótico, como el estrés osmótico (Mohusaien *et al.*, 2024). Entre las NPs que más requieren ser estudiadas se encuentran las de carbonato de calcio (CaCO_3) y sulfato de calcio (CaSO_4), compuestos que desempeñan un papel fundamental en la regulación del pH del suelo y en la disponibilidad de calcio, un nutriente esencial para el desarrollo vegetal (Prasad y Shivay, 2020).

El chile piquín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) es una variedad silvestre de gran importancia cultural y económica en México, conocida por su adaptabilidad a condiciones adversas y su bajo manejo intensivo (Quesada *et al.*, 2023). Sin embargo, su germinación y establecimiento pueden verse severamente afectados por el estrés osmótico, un fenómeno común en suelos con alta salinidad o sequía, este último afecta de manera drástica todos los procesos biológicos de las plantas por lo que restringe la producción, rendimiento y calidad exitosa de los cultivos a nivel mundial (Begna, 2021). Ante este escenario, la aplicación de NPs de CaCO_3 y CaSO_4 podría representar una estrategia innovadora para mejorar la germinación y el vigor de las semillas bajo condiciones de estrés, al modular la absorción de agua y nutrientes (Ayyaz *et al.*, 2022).

A pesar de los avances en el uso de NPs en la agricultura, aún existe un vacío de conocimiento sobre su efecto en especies nativas como el chile piquín, particularmente en condiciones de estrés osmótico. Por lo tanto, este estudio busca evaluar el impacto de las NPs de CaCO_3 y CaSO_4 en la germinación de semillas de chile piquín sometidas a estrés osmótico, con el fin de contribuir al desarrollo de tecnologías sostenibles para la producción agrícola en condiciones adversas.

2. JUSTIFICACIÓN

El estrés osmótico, causado por condiciones de salinidad o sequía, es uno de los principales factores que limitan la germinación y el crecimiento de las plantas, afectando significativamente la productividad agrícola. En el caso del chile piquín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*), un cultivo de gran importancia cultural y económica en México, este problema representa un desafío para su producción en regiones con suelos degradados o escasez de agua. Ante este escenario, el uso de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 surge como una alternativa innovadora para mejorar la germinación y el vigor de las semillas bajo condiciones adversas, ya que estos compuestos pueden regular el pH del suelo, mejorar la disponibilidad de nutrientes y mitigar los efectos del estrés osmótico. Este estudio busca contribuir al desarrollo de tecnologías sostenibles que permitan optimizar la producción de chile piquín en condiciones desfavorables, promoviendo la resiliencia de los sistemas agrícolas y la seguridad alimentaria.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de las nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en la germinación de semillas de chile piquín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) sometidas a estrés osmótico.

3.2 Objetivos específicos

- ✓ Determinar la concentración óptima de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 para la germinación de semillas de chile piquín.
- ✓ Comparar la eficacia de las nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en la mitigación del estrés osmótico durante la germinación.

4. HIPÓTESIS

La aplicación de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 mejora significativamente la germinación y el vigor de las semillas de chile piquín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) sometidas a estrés osmótico, en comparación con semillas no tratadas, debido a su capacidad para mejorar la absorción de agua y nutrientes, así como para regular el balance iónico en condiciones de estrés.

5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 Origen y distribución del chile piquín

El chile piquín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) es considerado una de las variedades silvestres más antiguas del género *Capsicum*. También se le conoce como Chiltepín, Amashito, Mashito o Chigolito. Su origen se remonta a Mesoamérica, específicamente a regiones de México, donde ha sido parte de la dieta y la cultura desde hace miles de años. Actualmente, se distribuye de manera natural en zonas tropicales y subtropicales de México, Centroamérica y el sur de Estados Unidos, adaptándose a diversos ecosistemas, desde selvas hasta áreas semiáridas (Aguilar-Rincón *et al.*, 2010).

El chile piquín se le atribuye ser el ancestro del resto de chiles que existen dentro de su género, su localización (figura 1) se encuentra en gran parte del territorio nacional que cubre del estado de Tamaulipas hasta el lado de Quintana Roo cubriendo la zona del Golfo de México, de igual forma se pueden encontrar plantas silvestres de esta especie en la zona que cubre desde Baja California al estado de Chiapas por la zona del Pacífico (Aguilar-Rincón *et al.*, 2010).

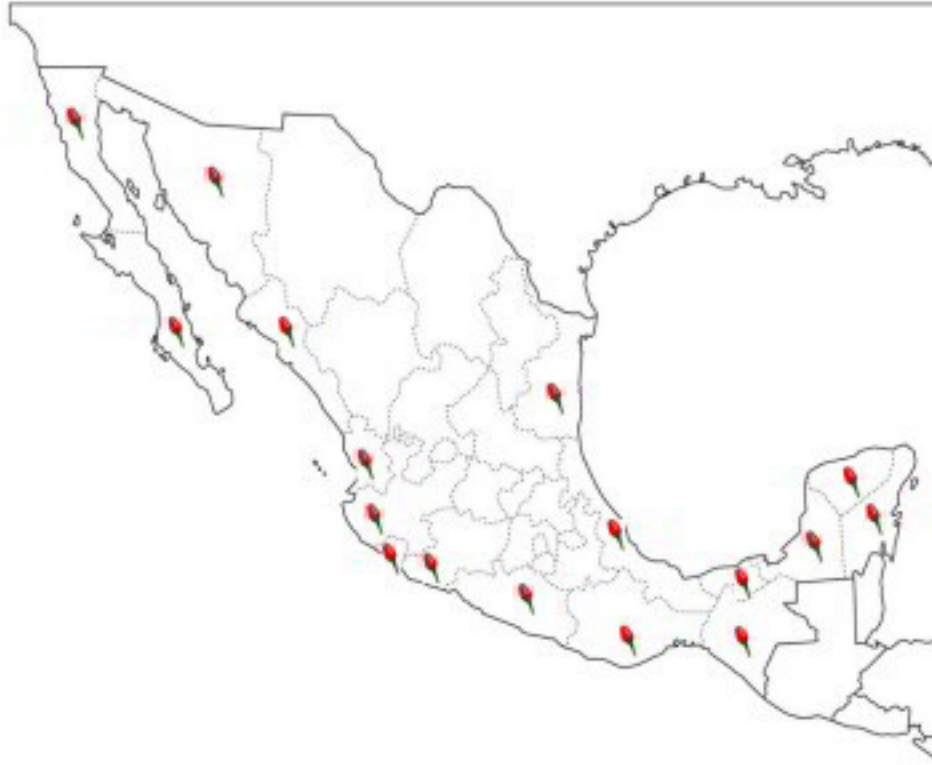


Figura 1. Distribución del chile piquín en la república mexicana. Elaboración propia.

5.2 Producción de chile piquín en México

La producción de esta hortaliza depende centralmente de su colecta, ya que se produce de manera silvestre dificultando su manejo y su establecimiento, además de que se reportan pérdidas de su hábitat y malas prácticas de colecta, ya que se daña de forma que no permite la regeneración de la planta (Sánchez *et al.*, 2018).

Para el año 2023 se indica que México tiene una superficie sembrada de 1 244.00 ha con un rendimiento de 1.17 udm/ha y una producción de 1 459.55. siendo Michoacán y Veracruz los principales productores con una superficie sembrada y cosechada de 48 ha y 1 196.00 ha en cada estado respectivamente, siendo Michoacán el que mayor rendimiento obtuvo con un 3.93 (udm)/ha superado a Veracruz a pesar de tener una mucho mayor superficie de siembra (SIAP, 2023).

Al chile piquín se le ha considerado una hortaliza exótica llegando a una demanda internacional por sus peculiaridades (Ramírez *et al.*, 2018). Pero en México se distribuye el 65 % de su producción y el 35 % de destina a la exportación (Martínez *et al.*, 2018).

5.3 Importancia económica

El chile piquín tiene un alto valor económico y cultural, especialmente en México, donde se utiliza ampliamente en la gastronomía tradicional. Su sabor picante y aroma distintivo lo hacen un ingrediente esencial en salsas, adobos y platillos regionales. Además, su cultivo y recolección representan una fuente de ingresos para comunidades rurales, ya que se comercializa tanto en mercados locales como en el sector gourmet. En los últimos años, su demanda ha aumentado debido a su uso en la industria alimentaria y a su reconocimiento como producto orgánico y silvestre, por lo que es necesario implementar innovación a este cultivo ya que la mayor cantidad de producción viene de colectas silvestres (Pedraza y Gómez, 2008).

El uso más importante del chile piquín en México es el gastronómico sobre todo en las poblaciones indígenas (Barros y Buenrostro, 2002) pero se cree que actualmente la globalización está contribuyendo a la pérdida de nuestros ingredientes autóctonos que enriquecen nuestra cultura gastronómica (Torres, 2000).

5.4 Clasificación taxonómica

El chile piquín pertenece a la familia *Solanaceae*, la misma que incluye a otros cultivos de gran importancia económica como el tomate, la papa y la berenjena. Dentro de esta especie y género (*Capsicum annum* var. *glabriusculum*) se encuentra una gran variedad de formas y tamaños y se agrupan principalmente en dos grupos (Laborde y Pozo 1982; Long *et al.*, 1999) como se ilustran en el siguiente cuadro:

Cuadro 1. Clasificación del chile *Capsicum annuum* var. *glabriusculum* de acuerdo a su nombre común, forma y su geografía dentro de la república mexicana (Laborde y Pozo 1982; Long et al., 1999).

TIPO DE CHILE	FORMA	UBICACIÓN GEOGRÁFICA
Chile chiltepín	Redondo u ovalado	Norte del país
Chile piquín	Forma un poco más alargada	Centro y sur de México

Su clasificación taxonómica es la siguiente (Aguilar-Meléndez, 2004):

- **Reino:** Plantae
- **División:** Magnoliophyta
- **Clase:** Magnoliopsida
- **Orden:** Solanales
- **Familia:** Solanaceae
- **Género:** *Capsicum*
- **Especie:** *Capsicum annuum*
- **Variedad:** *Capsicum annuum* var. *glabriusculum*

5.5 Morfología del chile piquín

El chile piquín es una planta perenne de crecimiento arbustivo, aunque en condiciones naturales puede comportarse como anual (Hernández et al., 1999). Sus características morfológicas principales son:

- a) **Tallo:** Delgado y ramificado, con una altura que varía entre 0.5 y 1.5 metros.

- b) **Hojas:** Pequeñas, lanceoladas y de color verde brillante, con un tamaño promedio de 2 a 5 cm de largo.
- c) **Flores:** Pequeñas, de color blanco o ligeramente amarillento, con cinco pétalos. Se presentan de manera solitaria o en pequeños grupos.
- d) **Frutos:** Pequeños, de forma ovalada o redondeada, con un diámetro de 0.5 a 1.5 cm. Cambian de color verde a rojo intenso al madurar. Son extremadamente picantes debido a su alto contenido de capsaicina.
- e) **Semillas:** Pequeñas, planas y de color amarillo pálido, distribuidas en el interior del fruto (Hernández *et al.*, 1999).

5.6 Germinación del chile piquín

La germinación es una etapa crítica en el ciclo de vida del chile piquín, ya que determina el éxito del establecimiento de la planta y dado que es una especie silvestre y de gran valor cultural y económico, optimizar este proceso es esencial para su conservación y aprovechamiento sostenible y el principal obstáculo para lograrlo es su dificultad de hacer germinar la semilla (Ramírez-Meraz *et al.*, 2003). Por lo que es necesario recurrir a procesos que permitan promover la germinación como lo es la aplicación de ácido giberélico (Ramírez-Meraz *et al.*, 2003). Además de entender los factores que influyen en la germinación es necesario desarrollar estrategias para mejorar su producción en condiciones adversas, como suelos degradados o climas extremos.

5.7 Estrés abiótico en la agricultura

El estrés abiótico es uno de los mayores desafíos para la agricultura a nivel global, ya que afecta negativamente la productividad y la calidad de los cultivos. Factores como la sequía, las temperaturas extremas, la salinidad del suelo y la contaminación pueden reducir significativamente el rendimiento de los cultivos, especialmente en regiones con condiciones climáticas adversas o suelos degradados (Kopecká *et al.*,

2023). Según la FAO, más del 20% de las tierras cultivables del mundo están afectadas por estrés abiótico, lo que representa una amenaza para la seguridad alimentaria.

Los cultivos agrícolas normalmente están expuestos a las condiciones ambientales mismas que a través de su desarrollo pueden alterar de forma negativa procesos como fotosíntesis, respiración entre otros, además el estrés ambiental en los cultivos durante el crecimiento y desarrollo conduce a modificaciones bioquímicas y morfológicas en las especies vegetales. Los efectos del estrés abiótico en las plantas van desde los cambios cualitativos y cuantitativos en la síntesis de tipos de proteínas, a la interrupción de la formación de las yemas florales y la polinización de la planta, así como una absorción deficiente de nutrientes que resulta en bajos rendimientos de los cultivos, se estima que alrededor del 51-82% del rendimiento de los cultivos en la agricultura mundial se pierde anualmente debido al estrés abiótico (Oshunsanya *et al.*, 2019).

5.7.1 Estrés osmótico

El estrés osmótico es la respuesta a un estímulo físico que propicia un gran número de cambios fisiológicos a nivel celular sobre todo aquellos relacionados con la turgencia celular y por tanto la rigidez e integridad de las membranas celulares (Yu *et al.*, 2024). Un problema común en regiones con escasez de agua o suelos con alta concentración de solutos. Este tipo de estrés afecta gravemente la productividad agrícola, especialmente en cultivos sensibles a la sequía o la salinidad ya que propician deshidratación, además de las heladas e hipoxia que pueden influir en la absorción o pérdida de agua (Oktem *et al.*, 2006). Según estudios, el estrés osmótico puede reducir el rendimiento de los cultivos hasta en un 50%, dependiendo de la intensidad y duración del estrés.

En la figura 2 se puede apreciar la simulación de la membrana celular semipermeable en dos sistemas acuosos. Donde cuando el potencial del soluto es

igual a cero (A) en ambos sistemas se mantiene un adecuado flujo del agua a través de la membrana, pero si dentro de un sistemas acuoso el potencial es menor a cero, los solutos pueden atravesar hacia donde se mantiene el potencial de soluto más negativo (B) y si se tiene solutos dentro y fuera es decir en ambos sistemas acuosos (C) los gradientes de concentración hacen que la mayoría de los solutos estén donde predomina la mayor cantidad de sales evitando el flujo de agua y nutrientes causando deshidratación hídrica a la células y por tanto, propiciando estrés (Yu *et al.*, 2024).

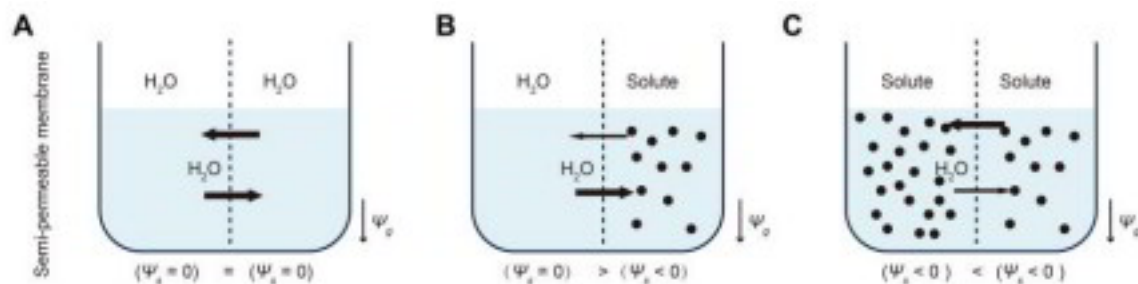


Figura 2. Potencial de soluto en dos sistemas acuosos con una membrana semipermeable. Ψ_s = potencial de soluto, Ψ_g =potencial gravitacional.

5.7.2 Estrés salino

El estrés salino es uno de los principales problemas en la agricultura, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde el riego con agua salina es común. Se estima que más del 6% de las tierras cultivables del mundo están afectadas por salinidad, lo que representa una amenaza para la producción de alimentos. Este factor abiótico es considerado uno de los más devastadores en cuando a afectaciones de la productividad de cultivos, ya que la alta concentraciones de sales en el suelo o el agua afecta procesos como la homeostasis celular, por lo que propicia toxicidad iónica que dificulta el buen desarrollo de los cultivos o altera el crecimiento, la acumulación de biomasa, la fotosíntesis y la germinación de semillas (Hasanuzzaman *et al.*, 2014).

Se estima que al menos la mitad de la producción agrícola con acceso a sistemas de riego están afectadas por la salinidad (Gong *et al.*, 2020). Dentro de la fertilidad

química la conductividad eléctrica permite determinar el nivel de salinidad de la solución del suelo o del agua de riego y algunos cultivos como el frijol, zanahoria, cebolla e incluso fresa son clasificados como sensibles a la salinidad y difícilmente toleran umbrales superiores a 1dS/m el cual es inferior a 4 dS/m el cual es un indicativo de un suelo salino (Munns y Tester, 2008).

La salinización pone en peligro los agroecosistemas, induciendo estrés salino en la mayoría de las plantas cultivadas (deficiencia de nutrientes, pH y estrés oxidativo, reducción de biomasa), y afecta directamente la calidad y cantidad de la producción de alimentos. Dependiendo del tipo de sal/estrés (alcalino o de pH neutro), se deben aplicar enfoques y soluciones específicos para mejorar la situación in situ. Diversas agrohidrotécnicas (conservación de suelos y aguas, labranza reducida, acolchado, recolección de agua de lluvia, riego y drenaje, control de la intrusión de agua de mar), biológicas (agroforestería, cultivos múltiples, cultivo de especies resistentes a la salinidad, inoculación bacteriana, promoción de micorrizas, injertos con porta injertos resistentes a la sal), químicas (aplicación de enmiendas orgánicas y minerales, fitohormonas), bioecológicas (mejoramiento, desalinización, aplicación de productos de base nanométrica, semillas bioprimering) y/o soluciones institucionales (monitoreo de la salinidad, estrategias nacionales y regionales integradas) son muy eficaces contra la salinidad/estrés salino y muchas otras limitaciones en la producción de cultivos (Ondrasek *et al.*, 2022).

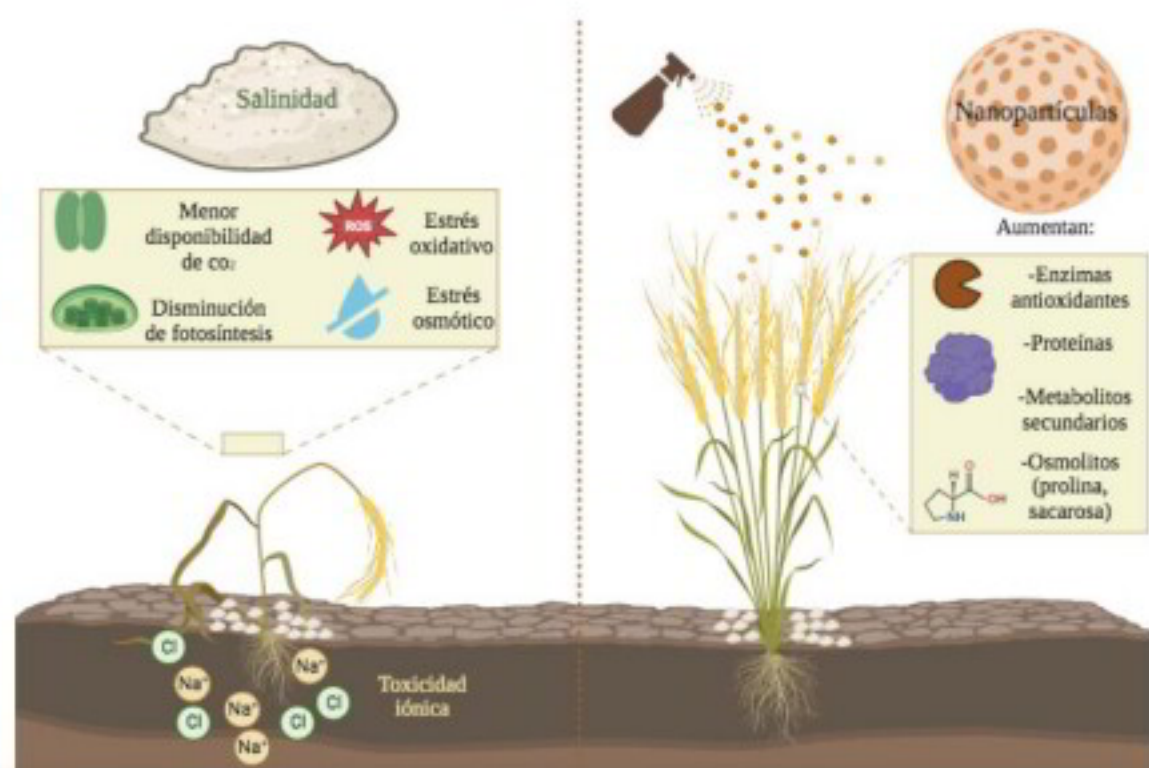


Figura 3. Efecto de las nanopartículas al estrés por salinidad (Magdaleno-García, y Méndez-López, 2023).

5.8 Nanotecnología en la agricultura

La nanotecnología, definida como la manipulación de la materia a escala nanométrica (1-100 nanómetros), ha emergido como una herramienta revolucionaria en la agricultura, ofreciendo soluciones innovadoras para mejorar la productividad, la sostenibilidad y la eficiencia en el uso de recursos. Esta tecnología permite diseñar materiales y sistemas con propiedades únicas, lo que ha abierto nuevas posibilidades para enfrentar desafíos globales como el cambio climático, la degradación del suelo, la escasez de agua y la creciente demanda de alimentos (Verma *et al.*, 2020). En este contexto, la nanotecnología se ha aplicado en áreas como la entrega controlada de nutrientes, la protección de cultivos, la mejora de la

germinación y el crecimiento de las plantas, el monitoreo de condiciones ambientales y la remediación de suelos contaminados (Manjunatha *et al.*, 2016).

Uno de los avances más significativos de la nanotecnología en la agricultura es la entrega controlada de nutrientes. Las nanopartículas pueden encapsular fertilizantes y liberarlos de manera gradual y controlada en el suelo, lo que reduce las pérdidas por lixiviación y mejora la eficiencia en el uso de nutrientes (Zhou *et al.*, 2024). Por ejemplo, nanopartículas de fósforo o nitrógeno han demostrado aumentar la disponibilidad de estos elementos esenciales para las plantas, lo que se traduce en un mejor crecimiento y rendimiento de los cultivos (Manikandan *et al.*, 2022). Además, la nanotecnología ha permitido desarrollar pesticidas y herbicidas más eficientes y menos tóxicos. Nanopartículas de plata, por ejemplo, han sido utilizadas por sus propiedades antimicrobianas para controlar patógenos que afectan a los cultivos, reduciendo la necesidad de agroquímicos convencionales y minimizando su impacto ambiental (Wang *et al.*, 2015).

En el ámbito de la germinación y el crecimiento de las plantas, las nanopartículas han demostrado un potencial significativo. Estas pueden estimular la germinación de semillas y mejorar el crecimiento de las plantas al facilitar la absorción de agua y nutrientes. Por ejemplo, nanopartículas de magnetita han sido utilizadas para promover la germinación de especies forestales *Quercus* (Pariona *et al.*, 2017), mientras que nanopartículas de sílice han mostrado mejorar la resistencia de las plantas al estrés abiótico (Bansal *et al.*, 2022). En el caso específico del chile piquín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*), el uso de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 podría representar una estrategia innovadora para mejorar la germinación y el vigor de las semillas bajo condiciones de estrés osmótico, facilitando la absorción de agua y nutrientes en suelos con alta concentración de solutos.

Otra aplicación importante de la nanotecnología en la agricultura es el desarrollo de sensores y sistemas de monitoreo. Los nanosensores permiten medir en tiempo real parámetros clave como la humedad del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la presencia de patógenos (Kaushal y Wani, 2017). Estos dispositivos, basados en materiales como los nanotubos de carbono o las nanopartículas metálicas, ofrecen

una precisión sin precedentes, lo que permite a los agricultores tomar decisiones informadas y optimizar el manejo de sus cultivos (Beegum y Das, 2022).

En resumen, la nanotecnología representa una herramienta poderosa para transformar la agricultura, ofreciendo soluciones innovadoras que mejoran la productividad, la sostenibilidad y la resiliencia de los sistemas agrícolas. En el contexto de tu investigación, el uso de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 para mejorar la germinación del chile piquín bajo estrés osmótico es un ejemplo concreto de cómo esta tecnología puede aplicarse para enfrentar desafíos específicos en la agricultura, contribuyendo al desarrollo de prácticas más eficientes y sostenibles.

5.8.1 Nanofertilizantes

Los nanofertilizantes representan una innovación significativa en el campo de la agronomía, donde la nanotecnología se aplica para mejorar la eficiencia de los nutrientes y reducir los impactos ambientales asociados con la fertilización convencional (Kumar *et al.*, 2021). Estos fertilizantes están compuestos por nanopartículas que contienen nutrientes esenciales para las plantas, como nitrógeno, fósforo, potasio, y micronutrientes como zinc, hierro y cobre (Nazeer *et al.*, 2023).

El funcionamiento de los nanofertilizantes se basa en su capacidad para liberar nutrientes de manera controlada y dirigida (Yadav *et al.*, 2023). A diferencia de los fertilizantes tradicionales, que suelen liberar nutrientes de forma rápida y no específica, los nanofertilizantes están diseñados para liberar los nutrientes de manera gradual y en sincronía con las necesidades de la planta. Esto se logra mediante el uso de materiales de recubrimiento o matrices que encapsulan los nutrientes y los liberan en respuesta a estímulos específicos, como cambios en el pH, la temperatura o la presencia de enzimas en el suelo. Esta liberación controlada no solo mejora la eficiencia en la absorción de nutrientes por parte de las plantas, sino que también reduce las pérdidas del mismo (Yadav *et al.*, 2023).

Además, los nanofertilizantes pueden ser diseñados para interactuar de manera específica con las raíces de las plantas o incluso ser absorbidos directamente a través de los estomas de las hojas. Esto permite una aplicación más precisa y reduce la cantidad de fertilizante necesario, lo que se traduce en un menor costo económico y ambiental (Liu y Lal, 2015). Desde el punto de vista científico, los nanofertilizantes también han demostrado tener efectos positivos en la fisiología de las plantas. Estudios han evidenciado que la aplicación de nanofertilizantes puede mejorar la fotosíntesis, aumentar la biomasa y mejorar la resistencia de las plantas a estrés abiótico, como la sequía o la salinidad. Esto se debe a que las nanopartículas pueden actuar como estimulantes del metabolismo vegetal, promoviendo la síntesis de clorofila y la actividad enzimática, lo que a su vez incrementa la capacidad de las plantas para absorber y utilizar los nutrientes de manera más eficiente (Ghormade *et al.*, 2011).

5.8.2 Nanobioestimulantes

Los nanobioestimulantes son una innovación emergente en el ámbito de la agronomía que combina los principios de la nanotecnología con los bioestimulantes tradicionales para mejorar el crecimiento, desarrollo y resistencia de las plantas. Aunque el término "nanobioestimulante" no está completamente aceptado en la literatura científica y aún genera debate entre los expertos, su uso se ha ido extendiendo para describir productos que integran nanopartículas con compuestos bioactivos que estimulan procesos fisiológicos en las plantas. Estos productos están diseñados para actuar a nivel molecular y celular, optimizando la eficiencia de los nutrientes, mejorando la tolerancia al estrés abiótico (Andleeba *et al.*, 2024; Harshit, 2024).

El funcionamiento de los nanobioestimulantes se basa en la capacidad de las nanopartículas para transportar y liberar compuestos bioactivos de manera controlada y dirigida. Estas nanopartículas pueden estar compuestas de materiales orgánicos, como polímeros biodegradables, o inorgánicos, como óxidos metálicos o sílice, y actúan como vehículos para entregar sustancias como aminoácidos,

hormonas vegetales, extractos de algas, ácidos húmicos y fúlvicos, o microorganismos beneficiosos directamente a las células de las plantas (Soni *et al.*, 2024). La ventaja clave de los nanobioestimulantes radica en su tamaño nanométrico, que les permite penetrar fácilmente en las paredes celulares y las membranas de las plantas, lo que facilita una absorción más rápida y eficiente de los compuestos bioactivos en comparación con los bioestimulantes convencionales (Upadhayay *et al.*, 2023).

Además de su función como transportadores, las nanopartículas en los nanobioestimulantes pueden tener efectos bioestimulantes por sí mismas. Por ejemplo, se ha demostrado que ciertas nanopartículas de óxido de zinc, hierro o cobre pueden mejorar la actividad enzimática en las plantas, aumentar la síntesis de clorofila y promover la producción de antioxidantes, lo que ayuda a las plantas a combatir el estrés oxidativo causado por condiciones adversas como la sequía, la salinidad o las temperaturas extremas (Andleeba *et al.*, 2024). Asimismo, estas nanopartículas pueden interactuar con los microorganismos del suelo, mejorando la microbiota beneficiosa y favoreciendo la disponibilidad de nutrientes en la rizósfera (Upadhayay *et al.*, 2023).

Los nanobioestimulantes representan una fusión innovadora entre la nanotecnología y los bioestimulantes tradicionales, ofreciendo nuevas herramientas para mejorar la productividad agrícola y la resiliencia de los cultivos (Kalia y Kaur, 2019). Su capacidad para entregar compuestos bioactivos de manera precisa, modular la expresión génica y mejorar la respuesta al estrés los convierte en una alternativa prometedora frente a los métodos convencionales (Zhao^b *et al.*, 2020). Sin embargo, su desarrollo y aplicación deben ir acompañados de investigaciones rigurosas que aborden los aspectos de seguridad, eficacia y sostenibilidad, así como de un marco regulatorio claro que garantice su uso responsable. Aunque el término "nanobioestimulante" aún no está completamente consolidado en la literatura científica, su potencial para revolucionar la agricultura es innegable, siempre y cuando se aborden los desafíos asociados con su implementación (Andleeba *et al.*, 2024).

5.9 Nanopartículas de calcio

Las nanopartículas de calcio son una herramienta innovadora en el campo de la agronomía que ha ganado atención debido a su capacidad para mejorar la disponibilidad y absorción de calcio en las plantas, un nutriente esencial que desempeña un papel crítico en la estructura y fisiología vegetal (Verma *et al.*, 2020). El calcio es fundamental para la estabilidad de las paredes celulares y las membranas, actúa como un mensajero secundario en las vías de señalización celular y es crucial para la división y elongación celular (White and Broadley, 2003). Sin embargo, la movilidad limitada del calcio en el suelo y dentro de la planta, así como su tendencia a formar compuestos insolubles, dificulta su absorción eficiente por parte de los cultivos (Bache, 2006). Aquí es donde las nanopartículas de calcio ofrecen una solución prometedora, ya que su tamaño nanométrico, generalmente entre 1 y 100 nanómetros, les confiere propiedades únicas que mejoran su solubilidad, dispersión y capacidad de penetración en los tejidos vegetales (Zhou *et al.*, 2024).

El funcionamiento de las nanopartículas de calcio se basa en su alta superficie específica y su capacidad para liberar iones de calcio de manera controlada y sostenida (Yadav *et al.*, 2023). A diferencia de las fuentes tradicionales de calcio, como el carbonato de calcio o el nitrato de calcio, que pueden precipitarse o lixiviarse rápidamente en el suelo, las nanopartículas de calcio están diseñadas para liberar el nutriente de manera gradual, lo que asegura una disponibilidad prolongada para las plantas. Esta liberación controlada se logra mediante el uso de materiales de recubrimiento o matrices que encapsulan las nanopartículas y las protegen de reacciones no deseadas en el suelo (Yadav *et al.*, 2023).

Una de las aplicaciones más destacadas de las nanopartículas de calcio es la prevención y corrección de trastornos fisiológicos en los cultivos causados por deficiencias de calcio, como la pudrición apical en tomates, pimientos y frutas, o el bitter pit en manzanas (Sanz *et al.*, 2001). Estos trastornos ocurren cuando el calcio no se distribuye adecuadamente dentro de la planta, especialmente en los frutos en desarrollo. Las nanopartículas de calcio, debido a su capacidad para penetrar las

paredes celulares y liberar calcio directamente en los tejidos, pueden mitigar estos problemas al asegurar una distribución más uniforme del nutriente. Estudios científicos han demostrado que la aplicación foliar de nanopartículas de calcio en cultivos como el tomate y la fresa no solo reduce la incidencia de pudrición apical, sino que también mejora la firmeza y la vida útil postcosecha de los frutos. Además de su papel en la nutrición vegetal, las nanopartículas de calcio también han mostrado efectos bioestimulantes y de mejora de la resistencia al estrés abiótico (Ayyaz *et al.*, 2022).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Ubicación del experimento

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Nutrición Mineral en el Departamento de Ciencias del Suelo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), localizado en las coordenadas geográficas, 25° 21' 13" latitud norte y 101° 01' 56" longitud oeste, con una altitud de 1742 msnm. Su precipitación media anual es de 350-400 mm y una temperatura media anual de 19.8°C.

6.2 Síntesis de las nanopartículas

Las nanopartículas de carbonato de calcio (CaCO_3) y sulfato de calcio (CaSO_4) fueron donadas por el Centro de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV), unidad Saltillo, Coahuila.

6.3 Establecimiento del experimento

6.3.1 Material vegetal

Se utilizaron semillas de chile piquín *Capsicum annuum* var. *glabriusculum* las cuales fueron colectadas en Poza Rica, Veracruz y se caracteriza por ser una planta silvestre de 0.5 a 1.5 metros de altura, con hojas pequeñas y lanceoladas, flores blancas y frutos redondos de 0.5 a 1.5 cm que, al madurar, son anaranjados, con un picor intenso. Las semillas son pequeñas, planas y abundantes.

6.3.2 Siembra

La siembra se realizó el 28 de mayo del 2024, se utilizaron placas Petri 90 x 15 mm de poliestireno estériles, donde se colocó a cada placa papel filtro Whatman de 125 mm del N. 1, colocando 15 semillas de chile piquín dispersas por toda la placa.

6.3.3 Riego

El riego se realizó todos los días revisando cada placa de manera individual y evitando el exceso y falta de humedad, se utilizó agua destilada para el riego, el cual se aplicaba con una piseta de 250 ml.

6.3.4 Diseño experimental y de tratamientos

Se estableció un diseño experimental completamente al azar, con 15 tratamientos y tres repeticiones que dieron un total de 45 unidades experimentales que corresponden a una placa Petri con 15 semillas del material vegetal.

6.3.5 Tratamientos y su aplicación

Cuadro 2. Descripción de los tratamientos aplicados en la germinación de chile piquín sometidas a estrés osmótico.

Tratamiento	Tipo de Nanopartícula	[NPs] mg/L	Estrés osmótico PEG-1500 (bar)
1	-	-	-
2	-	-	-0.5
3	-	-	-3
4	CaCO ₃	250	-
5	CaCO ₃	100	-
6	CaSO ₄	250	-
7	CaSO ₄	100	-
8	CaCO ₃	250	-0.5
9	CaCO ₃	250	-3
10	CaCO ₃	100	-0.5
11	CaCO ₃	100	-3
12	CaSO ₄	250	-0.5
13	CaSO ₄	250	-3

14	CaSO ₄	100	-0.5
15	CaSO ₄	100	-3

Los tratamientos consistieron en la aplicación de nanopartículas de carbonato de calcio y sulfato de calcio con concentraciones de 100 y 250 mg/L a las semillas de chile piquín con dos parámetros de estrés osmótico (-0.5 y -3 bares). La aplicación del estrés osmótico se realizaba mediante el riego cada que se realizaba con el uso de una piseta correspondiente a cada tratamiento. (Cuadro 2).

Tratamiento a las semillas

Se realizó un tratamiento previo a la semilla donde se colocaron en las soluciones correspondientes de 100 y 250 mg/L, colocando la cantidad de semillas que corresponde según los tratamientos durante 24 horas previas al establecimiento. Este proceso se realizó en todos los tratamientos con y sin nanopartículas.

Tratamientos para generar el estrés osmótico

Se realizó una solución de polietilenglicol (PEG 1500) de grado analítico, disolviendo 20 y 100 g /L de solución generando estrés osmótico en las semillas tratadas expresado a -0.5 y -3 bar respectivamente.

6.4 Registro de datos y variables de estudio

6.4.1 Variables en la germinación de semilla de chile piquín

Porcentaje de germinación

El porcentaje de germinación se calculó en base a Bewley *et al.* (2013), donde se midió la cantidad de semillas que han completado la germinación en un momento dado, para esto se utilizó la siguiente formula:

$$\text{Porcentaje de germinación} = (Ae \times 100) / M$$

Donde Ae es la germinación acumulada hasta la última evaluación, y M es la total de semillas sembradas.

Tiempo medio de germinación

Se midió el tiempo medio de germinación, que describe el tiempo promedio para que una semilla germine, o el retraso desde el inicio de la imbibición hasta la emergencia de la radícula (Feizi *et al.*, 2012).

$$\text{Tiempo medio de germinación} = \frac{\sum(nt)}{\sum n}$$

Donde n es el número de semillas recién germinadas en el tiempo t, y t es el número de días desde la siembra.

Tasa de germinación

Tasa de germinación o velocidad de germinación es un concepto de vigor de plántulas; sin embargo, puede ser útil para evaluar cuán rápido germinan las semillas en cada tratamiento (Feizi *et al.*, 2012).

$$\text{Tasa de germinación} = \sum \left(\frac{n}{t} \right)$$

Porcentaje de germinación relativo

Se utiliza los tratamientos sometidos al estrés osmótico y se comparan con el tratamiento control, comparando así el posible efecto del factor de interés en comparación a las condiciones normales.

$$PGR = \left(\frac{PG_{\text{estrés}}}{PG_{\text{control}}} \right) \times 100$$

Dónde: PGR es el porcentaje de germinación relativo y PG es el porcentaje de germinación.

Velocidad de germinación

Es un indicador de la rapidez acumulada de germinación en relación al tiempo, se calcula con la siguiente formula:

$$VG = \sum \left(\frac{ni}{ti} \right)$$

Dónde: VG es la velocidad de germinación y ni es el número de semillas germinadas en el día i, y ti es el día en el que germinaron.

6.4.2 Variables agronómicas

Altura de plántula

Se midió la altura de cada plántula (cm) germinada presente en cada placa Petri, partiendo de la división entre el tallo y la raíz hasta la zona meristemática con el uso de un flexómetro, se utilizó el promedio total de la altura de todas las plántulas que correspondían a la unidad experimental (placa Petri).

Diámetro de tallo

Se utilizó un vernier digital (mm) con el cual se midió el diámetro de cada plántula a 2 mm de altura de la raíz sobre el tallo.

Longitud de raíz

Se midió la longitud de raíz (cm) de cada plántula germinada presente en cada placa Petri, partiendo de la división entre el tallo y la raíz hasta la zona meristemática de

la raíz, con el uso de un flexómetro, se utilizó el promedio total de todas las plántulas que correspondían a la unidad experimental (placa Petri).

Peso fresco total

Se midió el peso fresco de cada plántula (g) germinada presente en cada placa Petri, se utilizó una balanza semianalítica (GX-200), se utilizó el promedio total del peso fresco de todas las plántulas que correspondían a la unidad experimental (placa Petri).

Peso seco total

Se midió el peso seco de todas las plántulas (g) germinada presente en cada placa Petri, para lo cual se colocaron en estufa de secado (modelo MAPSA, HDP-334) durante 72 horas a 80°C en bolsas papel secante, transcurrido ese tiempo se utilizó una balanza semianalítica (GX-200) para obtener el valor de peso seco a cada tratamiento y repetición.

6.5 Análisis estadístico

Los datos obtenidos se evaluaron en un diseño completamente al azar con el programa Infostat versión 2020 y un análisis de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$).

7. RESULTADOS

7.1 Variables en la germinación de chile piquín

7.1.1 Porcentaje de germinación

Los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran los efectos de la aplicación de nanopartículas de carbonato de calcio (CaCO_3) y sulfato de calcio (CaSO_4) en la germinación de semillas de chile piquín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*), tanto en condiciones óptimas como bajo estrés hídrico inducido por PEG (polietilenglicol). La aplicación de nanopartículas, especialmente S-Ca-250, favorece la germinación en condiciones normales y mitiga los efectos del estrés hídrico moderado, demostrando su potencial como bioestimulante en la germinación de chile piquín, ya que obtuvo diferencias estadísticas significativas respecto a los tratamientos sometidos a las diferentes condiciones.

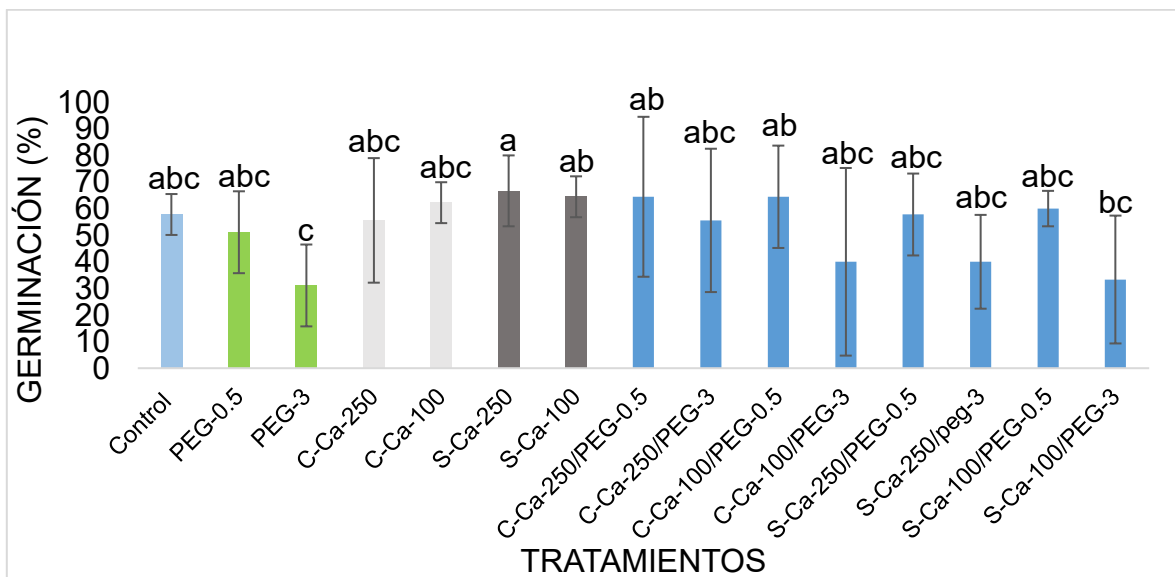


Figura 4. Efecto de la aplicación de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en la germinación de semillas de chile piquín sometidas a estrés osmótico. Cada barra de la gráfica representa el promedio por tratamiento \pm el error estándar. Sobre cada barra se muestra letras diferentes indicando diferencia significativa entre tratamientos de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($\alpha=0.05$).

Por su parte la aplicación de PEG tuvo un impacto negativo en la germinación de las semillas, esto es debido a que PEG-3 redujo significativamente la germinación hasta 31.11%, lo que confirma el efecto adverso del estrés hídrico severo. Mientras que PEG-0.5 también afectó la germinación, pero en menor medida (51.11%), sin diferencias significativas con el control. Respecto a los tratamientos con nanopartículas sin estrés mostraron una tendencia a mejorar la germinación en comparación con el control (57.78%), donde el tratamiento de S-Ca-250 presentó la mayor tasa de germinación (66.67%), mostrando una diferencia significativa con el control, para S-Ca-100 y C-Ca-100 mostraron valores intermedios (64.44% y 62.22%, respectivamente), sin diferencias estadísticas significativas con S-Ca-250, finalmente para C-Ca-250 tuvo una germinación del 55.56%, similar al tratamiento control. En los tratamientos bajo estrés osmótico, las NPs mostraron la capacidad de mitigar el impacto negativo de PEG, especialmente en PEG-0.5, donde C-Ca-250/PEG-0.5 y C-Ca-100/PEG-0.5 mejoraron la germinación hasta 64.44%, valores similares a los tratamientos sin estrés. Los resultados para S-Ca-100/PEG-0.5 también mejoró la germinación (60%) y para PEG-3, las NPs aún mostraron efecto protector, pero limitado, con valores entre 33.33% y 55.56%. por lo que las NPs, principalmente en PEG-0.5. Por lo tanto, el mejor tratamiento es S-Ca-250 (66.67%), significativamente mayor que el control, mientras que el peor tratamiento fue el PEG-3 (31.11%), con la germinación más baja y las NPs ayudan en estrés moderado (PEG-0.5), pero el efecto en PEG-3 es más limitado. En el trabajo realizado por Yugandhar y Savithamma 2013, incrementaron la germinación de *Vigna mungo* con NPs de calcio en un 92 % cerca de un 5 % más que su control, manteniendo resultados similares a los que se obtuvieron en la presente investigación. Por su parte Sankarmani *et al.* 2023 evaluaron la germinación de plántulas de arroz donde hubo una mejora del porcentaje de germinación de un 12.3% respecto a su control a concentraciones de 40 ppm de NPs de CaO además encontraron que entre concentraciones más altas de NPs de CaO disminuye el efecto de la germinación, pudieron considerar que tal vez concentraciones más bajas de las NPs que se usaron en este trabajo tengan una respuesta más eficiente en este experimento. Mientras que el trabajo de Koca *et al.* 2021 con 50 mg/kg

incrementaron la germinación un 50 % más respecto a su control y sometieron las semillas de frijol a estrés salino manteniendo esta variable mucho más alta, estos datos siguen indicando que sería mejor trabajar dosis más bajas de nanomateriales ya que pueden propiciar una fitotoxicidad al disponer de una alta concentración por parte de la plántula disminuyendo así el potencia germinativo, ya que al combinar con un factor de estrés la respuesta puede verse aún más afectada.

7.1.2 Otros parámetros en la germinación de chile piquín

En el cuadro 3, se muestran los resultados de las variables: porcentaje de germinación relativo (%), tiempo medio de germinación (días), tasa de germinación (plántulas germinadas por día) y la velocidad de germinación en respuesta a la aplicación de NPs de CaCO_3 y CaSO_4 en la germinación de semillas de chile piquín sometidas a estrés osmótico. Los resultados muestran diferencias estadísticas significativas en los diferentes tratamientos aplicados en cada variable, donde se desarrolla a continuación.

Para la variable porcentaje de germinación relativo se puede observar que el tratamiento con S-Ca-250 (118.3%) mostró el mayor porcentaje de germinación, seguido de S-Ca-100 (113.3%) y C-Ca-250/PEG-0.5 (116.7%), lo que indica que el calcio en solución mejora la germinación del chile piquín. Todos los tratamientos con calcio, ya sea como carbonato (C-Ca) o sulfato (S-Ca), incrementaron significativamente la germinación en comparación con el control. En cambio, PEG-3 (53.3%) mostró el menor porcentaje, sugiriendo que la mayor concentración de PEG (estrés hídrico) redujo la germinación. Las combinaciones con PEG-3 tendieron a reducir el porcentaje de germinación, como en S-Ca-100/PEG-3 (60.8%) y C-Ca-250/PEG-3 (96.7%), lo que sugiere que el estrés osmótico afecta negativamente la germinación.

Para la variable tiempo medio de germinación (cuadro 3) varió entre 7.92 y 9.09 días, con el menor tiempo en C-Ca-100 (7.92 días), lo que sugiere una germinación más rápida bajo este tratamiento. Los tratamientos con PEG tienden a aumentar el

tiempo medio de germinación, como en C-Ca-250/PEG-3 (9.09 días), lo que indica un retraso en la germinación. El Calcio solo (S-Ca, C-Ca), mantiene tiempos de germinación relativamente estables (7.92 a 8.76 días) y la combinación de Calcio + PEG aumenta ligeramente el tiempo de germinación, pero no de manera drástica, mientras que PEG-3 solo prolonga la germinación más que PEG-0.5.

Cuadro 3. Resultados del efecto de la aplicación de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en la germinación de semillas de chile piquín sometidas a estrés osmótico.

Tratamiento	PGR	TMG	TG	VG
Control	57.8 cd	7.99 cd	0.72 abc	5.54 ab
PEG-0.5	88.3 abcd	8.65 abc	0.64 abc	4.08 ab
PEG-3	53.3 d	8.53 abcd	0.39 c	2.95 b
C-Ca-250	94.2 abcd	8.73 ab	0.69 abc	4.73 ab
C-Ca-100	108.3 abc	7.92 d	0.78 abc	5.66 ab
S-Ca-250	118.3 a	8.55 abcd	0.83 abc	6.19 a
S-Ca-100	113.3 ab	8.6 abc	0.81ab	6.31 a
C-Ca-250/PEG-0.5	116.7 a	8.94 a	0.81 ab	5.12 ab
C-Ca-250/PEG-3	96.7 abcd	9.09 a	0.69 abc	3.59 ab
C-Ca-100/PEG-0.5	110.0 abc	8.76 ab	0.81 ab	6.07 a
C-Ca-100/PEG-3	101.5 abcd	8.72 ab	0.5 abc	3.76 ab
S-Ca-250/PEG-0.5	100.0 abcd	8.91 ab	0.72 abc	4.49 ab
S-Ca-250/PEG-3	70.8 abcd	8.47 abcd	0.5 abc	4.08 ab
S-Ca-100/PEG-0.5	105.0 abcd	8.73 ab	0.75 abc	5.19 ab
S-Ca-100/PEG-3	60.8 bcd	8.23 bcd	0.42 bc	3.88 ab

Letras diferentes indican diferencia estadística significativa entre tratamientos de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($\alpha=0.05$). PGR= porcentaje de germinación relativo. TMG= tiempo medio de germinación. TG= tasa de germinación. VG= velocidad de germinación.

En la tasa de germinación los tratamientos con S-Ca-250 (0.83) y S-Ca-100 (0.81) presentan las tasas más altas de germinación por día, indicando que las semillas germinan más rápidamente. El control presenta una tasa intermedia, mientras que PEG-3 (0.39) muestra la menor tasa de germinación. Por lo que el calcio mejora la tasa de germinación, mientras que PEG-3 la reduce drásticamente. Finalmente, para la velocidad de germinación los tratamientos con S-Ca-100 (6.31) y S-Ca-250 (6.19) presentaron la mayor velocidad de germinación, indicando que las semillas germinan de manera más rápida y eficiente.

El control mostró una velocidad de germinación aceptable, pero todos los tratamientos con calcio (C-Ca, S-Ca) la superaron. Las combinaciones con PEG-3 tienden a disminuir la velocidad de germinación, como en C-Ca-250/PEG-3 (3.59) y S-Ca-250/PEG-3 (4.08).

En trabajos como el López-Martínez *et al.* 2023 encontraron que NPs de hidroxiapatita a concentraciones de 25 mg/L mejoran la germinación y vigor de plántulas de pepino y que concentraciones de 200 mg/L mostraron efectos inhibidores, lo que nos indica que dosis más bajas podrían desempeñar un mejor efecto que las concentraciones utilizadas en este trabajo. La investigación realizada por Ruiz-Torres y García 2021 encontraron que en la germinación de rábano se vio afectados parámetros como el índice de germinación como el vigor y el porcentaje de germinación cuando se utilizaron dosis altas de hidroxiapatita de 500 mg/L lo cual sigue marcando una tendencia a emplear dosis más bajas de NPs en la germinación. Por su parte Nejatadeh 2021 encontró que con NPs de plata a concentraciones de 40, 60 y 80 ppm incrementa la tasa de germinación en comparación a su tratamiento control en plantas de *Satureja hortensis* sometidas a estrés salino, sus datos no coinciden del todo con los obtenidos en este trabajo pudiendo atribuirse al tipo de NPs, especie vegetal y las concentraciones utilizadas en cada experimento. En el trabajo realizado por Azimi *et al.* 2014 aplicaron NPs de SiO₂ en la germinación de *Agropyron Elongatum* en diferentes concentraciones mejorando parámetros como la media de germinación diaria y mostrando en otros parámetros como el tiempo medio de germinación efectos que el tratamiento control

se vio favorecido en condiciones de pre enfriamiento, quedando claro que la respuesta de las especies vegetales es fluctuante en los diferentes parámetros de respuesta y las condiciones que conciernen a cada diseño de tratamientos. En general se puede apreciar que las NPs pueden propiciar o inhibir para metros de germinación en las especies vegetales.

7.2 Variables agronómicas de chile piquín

Los resultados para las variables número de raíces secundarias y número de plántulas anormales, se muestran en el Cuadro 4, donde se puede apreciar diferencias estadísticas significativas en cada variable de respuesta establecida.

El tratamiento más efectivo de acuerdo al análisis de comparación de medias en la formación de raíces secundarias (NRS) fue C-Ca-100/PEG-0.5 (NRS = 14.67, TRS = 44) superando al control con 61 %, seguido de S-Ca-100/PEG-0.5 (NRS = 12.00, TRS = 36). Esto indica que la combinación de nanopartículas de calcio con PEG a baja concentración favorece el desarrollo radicular. Mientras que el tratamiento más bajo fue S-Ca-100/PEG-3 (NRS = 0.00, TRS = 0), indicando que el PEG en alta concentración afectó negativamente el desarrollo radicular.

Para el número de plántulas anormales (NPA) fue el tratamiento C-Ca-250/PEG-3 el que presentó el mayor número de plántulas anormales (NPA = 7.33, TPA = 22), lo que sugiere que una alta concentración de PEG combinada con nanopartículas de CaCO_3 afecta negativamente la morfología de las plántulas, mientras que el tratamiento de S-Ca-100/PEG-0.5 mostró el menor número de plántulas anormales (NPA = 2.67, TPA = 8), indicando que este tratamiento favoreció el desarrollo normal de las plántulas. La presencia de PEG-3 y C-Ca-100/PEG-3 también mostraron bajos valores de raíces secundarias (0.67 y 0.33, respectivamente), confirmando que el estrés osmótico severo limita el crecimiento radicular. Para los tratamientos con nanopartículas de calcio mejoraron el desarrollo radicular en condiciones de estrés osmótico, especialmente cuando se combinaron con PEG-0.5. Las altas concentraciones de PEG (3.0) afectaron negativamente la formación de raíces y

aumentaron la presencia de plántulas anormales debido al estrés hídrico que este genera para el desarrollo óptimo de las plántulas de chile piquín.

Cuadro 4. Resultados de las variables número de raíces secundarias y número de plántulas anormales de la aplicación de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en la germinación de semillas de chile piquín sometidas a estrés osmótico.

Tratamiento	NRS	TRS	NPA	TPA
Control	5.67 bcde	17	6.00 ab	18
PEG-0.5	7.33 bc	22	6.00 ab	18
PEG-3	0.67 de	2	4.00 ab	12
C-Ca-250	7.33 bc	22	3.33 ab	10
C-Ca-100	6.67 bcd	20	5.00 ab	15
S-Ca-250	11.00 ab	33	3.33 ab	10
S-Ca-100	9.00 ab	27	6.33 ab	19
C-Ca-250/PEG-0.5	10.00 ab	30	5.67 ab	17
C-Ca-250/PEG-3	0.67 de	2	7.33 a	22
C-Ca-100/PEG-0.5	14.67 a	44	3.67 ab	11
C-Ca-100/PEG-3	0.33 de	1	5.33 ab	16
S-Ca-250/PEG-0.5	8.33 ab	25	3.33 ab	10
S-Ca-250/PEG-3	1.67 cde	5	4.67 ab	14
S-Ca-100/PEG-0.5	12.00 ab	36	2.67 b	8
S-Ca-100/PEG-3	0.00 e	0	5.67 ab	17

Letras diferentes indican diferencia estadística significativa entre tratamientos de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($\alpha=0.05$). NRS= número de raíces secundarias. TRS= total de raíces secundarias. NPA= número de plántulas anormales. TPN= total de plántulas anormales.

Se consideran anormales todas aquellas plántulas que manifestaron alguna deformación en su desarrollo normal (AOSA, 1983). La investigación realizada por Samadi *et al.* 2014 encontraron que concentraciones de 100 mg/L de NPs de TiO_2

incrementan el desarrollo radicular de plántulas de *Mentha piperita* pero al usar 200 mg/L de esas mismas NPs se presentó una inhibición del desarrollo radicular. Estos resultados nos indican que dosis de 100 mg pueden generar un efecto positivo en la raíz de diferentes cultivos debido a que esta dosis de NPs de carbonato de calcio mostraron los resultados más altos. Por su parte el trabajo realizado por Faraji y Sepehri 2019 aplicando estrés osmótico con PEG a -0.4 y -0.8 MPa en la germinación de trigo encontrando que las concentraciones de 500, 1000 y 2000 mg/L de NPs de TiO₂ disminuyen el crecimiento de la raíz de sus plántulas, además del porcentaje de germinación, sus resultados al compararlos con los utilizados en este trabajo muestran condiciones más hostiles de crecimiento para las plántulas, tanto, en el estrés expuesto como las dosis de su tipo de NPs por lo que sus resultados no coinciden con los encontrados en este trabajo. En el trabajo de Wang^b *et al.* 2023 aplicaron diferentes porcentajes de PEG del 5, 10 y 15 % y dosis de NPs de 25, 50 100 y 200 mg/L de SiO₂, Al₂O₃ y TiO₂ donde encontraron que la raíz de plántulas de okra donde parece ser que la dosis de 50 mg fue la que afecto de forma más drástica el crecimiento de la raíz, sus resultados son en cierta medida similares a los obtenidos en este trabajo ya que algunas dosis y NPs fomentaron un crecimiento positivo en la raíz.

7.2.1 Peso seco total

En la figura 5, se puede apreciar los resultados para la variable peso seco total, donde los resultados muestran diferencias estadísticas significativas, siendo el mejor tratamiento C-Ca-100/PEG-0.5 (11.83 g), lo que sugiere que una dosis baja de carbonato de calcio con un estrés moderado genera el mayor desarrollo de biomasa, ya que supero al tratamiento control en un 67 %. De igual forma se observa que el tratamiento con PEG-3 reduce drásticamente el peso seco de las plántulas (1 g), lo que confirma que un estrés osmótico fuerte limita el crecimiento. Los tratamientos con PEG-0.5 también afecta el peso seco, aunque en menor medida (4.5 g), pero sigue por debajo del control (3.9 g). y cuando se combina PEG-3 con cualquier nanopartícula, el peso seco es extremadamente bajo (valores entre

0 y 2.57 g), lo que sugiere que las nanopartículas no logran mitigar el impacto de un estrés osmótico severo. En cuanto a CaCO_3 (C-Ca): a 250 mg/L (6.8 g) y 100 mg/L (6.2 g), ambas concentraciones aumentan el peso seco en comparación con el control. Mientras que las NPs de CaSO_4 (S-Ca) a 250 mg/L (8.27 g) y 100 mg/L (5.4 g), donde la dosis más alta tiene un mejor efecto en el crecimiento. De igual forma se aprecia que todos los tratamientos con PEG-3 tienen valores muy bajos de peso seco, destacando especialmente que S-Ca-100/PEG-3 el cual no permitió el desarrollo de biomasa (0 g), ya que todas fueron plántulas anormales.

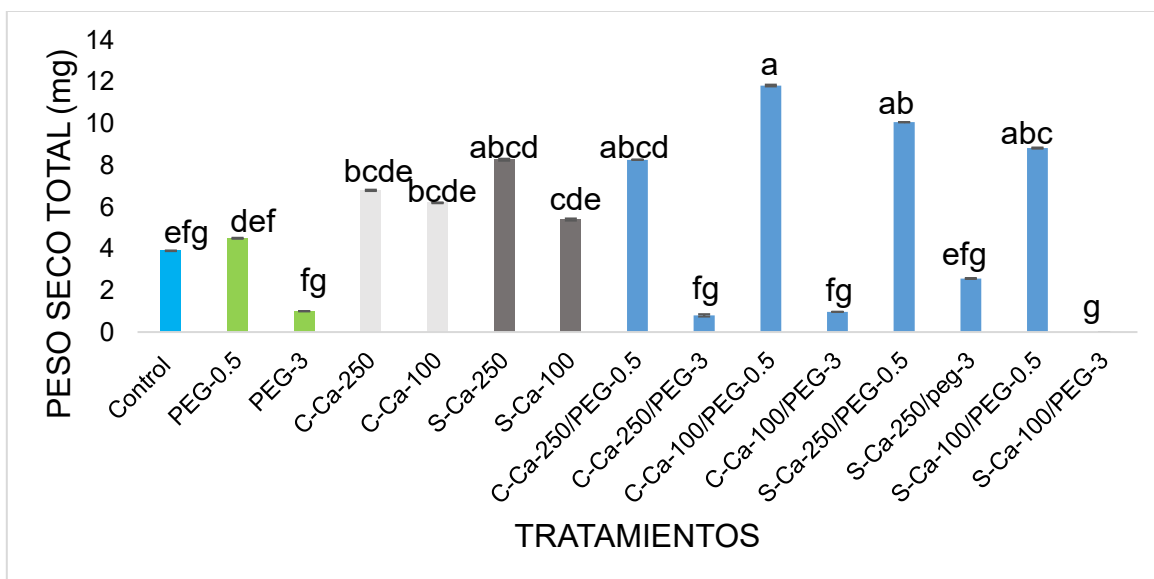


Figura 5. Efecto de la aplicación de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en el peso seco total de plántulas de chile piquín sometidas a estrés osmótico. Cada barra de la gráfica representa el promedio por tratamiento \pm el error estándar. Sobre cada barra se muestra letras diferentes indicando diferencia significativa entre tratamientos de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($\alpha=0.05$).

En el trabajo realizado por Lahuta *et al.* 2022 con la aplicación de NPs de plata a concentraciones de 20 y 40 mg afectaron la variable de peso en comparación a su tratamiento control en tres variedades diferentes del cultivo de trigo, resultados que no coinciden que los encontrados en este trabajo donde no se afectó el peso seco total debido a las concentraciones de NPs de calcio, esto pudiera ser debido a que la plata pudiera ser más agresiva cuando se aplica a los cultivos. Por su parte López-

Martínez *et al.* 2023 encontraron que la aplicación de diferentes dosis de NPs de hidroxiapatita no presenta un efecto en el peso seco de plántulas de pepino, datos que no coinciden con los encontrados en este trabajo ya que el chile piquín hubo diferencias en esta variable. Por parte el trabajo realizado por Azimi *et al.* 2014 aplicaron NPs de SiO₂ en la germinación de *Agropyron Elongatum* en concentraciones de 40 mg/L incremento el peso seco de las plántulas en comparación a su tratamiento control tanto en raíz como en biomasa aérea.

7.2.2 Otros parámetros en plántulas de chile piquín

En el cuadro 5, se aprecian los resultados para la variable diámetro de plántula (DP), peso fresco de plántula (PF), peso fresco total por unidad experimental (PFT), longitud de raíz por plántula (LR) y altura de plántula (AP), en plántulas de chile piquín sometidas a estrés osmótico y a la aplicación de nanopartículas de carbonato y sulfato de calcio donde se aprecian diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en las diferentes variables evaluadas. De forma general se puede apreciar que el estrés osmótico (especialmente PEG-3) afecta severamente el crecimiento de plántulas de chile piquín, reduciendo biomasa, altura y desarrollo radicular, mientras que las nanopartículas mejoran el crecimiento en condiciones normales, con S-Ca-100 mostrando los mejores valores en PFT y PF. La combinación de nanopartículas con estrés moderado (PEG-0.5) puede mitigar parcialmente los efectos negativos, con C-Ca-100/PEG-0.5 como el mejor tratamiento por su parte el estrés severo (PEG-3) no se compensa con nanopartículas, ya que las plántulas apenas logran desarrollarse.

Los tratamientos en estrés osmótico reducen significativamente el crecimiento de las plántulas. Debido a que los resultados con PEG-3 tiene los valores más bajos en todas las variables, con una reducción drástica en DP (0.30 mm), PF (0.004 g), PFT (0.010 g), AP (0.57 cm) y una disminución moderada en LR (0.77 cm) y el estrés moderado PEG-0.5 tiene un menor impacto en comparación con PEG-3, aunque sigue mostrando reducciones en PF (0.009 g) y PFT (0.030 g), por lo que a mayor concentración de PEG, mayor afectación en el desarrollo de las plántulas, lo

que indica que el estrés osmótico afecta directamente la acumulación de biomasa y el crecimiento radical y aéreo. Los tratamientos con nanopartículas sin estrés osmótico presentan mejoras en todas las variables en comparación con el control, ya que el tratamiento de CaCO_3 (C-Ca-250 y C-Ca-100): Mantienen valores similares en DP (0.70 mm), PF (0.010-0.012 g) y PFT (0.070 g) y el tratamiento de CaSO_4 (S-Ca-250 y S-Ca-100) fueron los tratamientos de S-Ca-100 y S-Ca-250 que presentan los valores más altos en PFT (0.100 g), PF (0.012-0.015 g) y DP (0.77 mm) y S-Ca-100 es el mejor tratamiento sin PEG, con un DP de 0.77 mm, el PF más alto (0.015 g) y el PFT más alto (0.100 g), por lo que la aplicación de CaSO_4 (en especial S-Ca-100) muestra mejores resultados que CaCO_3 en la promoción del crecimiento de plántulas de chile piquín en condiciones normales.

Cuadro 5. Resultados de las variables diámetro de plántula, peso fresco por plántula, peso fresco total, longitud de raíz y altura de plántula de la aplicación de nanopartículas de CaCO_3 y CaSO_4 en la germinación de semillas de chile piquín sometidas a estrés osmótico.

Tratamientos	DP (mm)	PF (g)	PFT (g)	LR (cm)	AP (cm)
Control	0.70 a	0.013 ab	0.050 bcd	0.20 abc	1.33 a
PEG-0.5	0.60 a	0.009 bc	0.030 cde	0.80 a	1.00 a
PEG-3	0.30 b	0.004 c	0.010 de	0.77 ab	0.57 b
C-Ca-250	0.70 a	0.010 bc	0.070 abc	0.23 abc	1.23 a
C-Ca-100	0.70 a	0.012 abc	0.070 abc	0.23 abc	1.27 a
S-Ca-250	0.70 a	0.012 abc	0.100 ab	0.20 abc	1.23 a
S-Ca-100	0.77 a	0.015 a	0.100 ab	0.27 abc	1.33 a
C-Ca-250/PEG-0.5	0.67 a	0.012 abc	0.080 abc	0.43 abc	1.20 a
C-Ca-250/PEG-3	0.17 bc	0.002 d	0.030 cde	0.10 bc	0.23 bc
C-Ca-100/PEG-0.5	0.70 a	0.012 c	0.110 a	0.27 abc	1.17 a
C-Ca-100/PEG-3	0.17 bc	0.002 d	0.010 de	0.17 abc	0.23 bc
S-Ca-250/PEG-0.5	0.60 a	0.008 c	0.070 abc	0.27 abc	1.00 a
S-Ca-250/PEG-3	0.23 bc	0.014 d	0.010 de	0.07 c	0.20 bc
S-Ca-100/PEG-0.5	0.67 a	0.083 abc	0.080 abc	0.57 abc	1.13 a
S-Ca-100/PEG-3	0.00 c	0.000 d	0.000 e	0.00 c	0.00 c

Letras diferentes indican diferencia estadística significativa entre tratamientos de acuerdo con la prueba de medias Tukey ($\alpha=0.05$). DP=diámetro de plántula. PF: peso fresco por plántula. PFT= peso fresco total. LR= longitud de raíz. AP= altura de plántula.

Respecto a la interacción de los factores de evaluación se puede apreciar que el tratamiento C-Ca-100/PEG-0.5 mostró el mayor peso fresco total (0.110 g), lo que indica que la combinación de una dosis baja de carbonato de calcio con estrés osmótico moderado favorece la acumulación de biomasa y S-Ca-100/PEG-0.5 también tuvo buenos resultados (PFT: 0.080 g, LR: 0.57 cm), aunque ligeramente inferiores a C-Ca-100/PEG-0.5, finalmente los tratamientos de S-Ca-250/PEG-0.5 y C-Ca-250/PEG-0.5 mantienen valores similares a los tratamientos sin estrés, lo que sugiere que el impacto de PEG-0.5 se mitiga parcialmente con la aplicación de nanopartículas, entonces de acuerdo a nuestros resultados destaca C-Ca-100/PEG-0.5 y S-Ca-100/PEG-0.5 como los tratamientos más efectivos para mitigar el impacto del estrés osmótico moderado. La combinación de nanopartículas con estrés moderado (PEG-0.5) puede mitigar parcialmente los efectos negativos, con C-Ca-100/PEG-0.5 como el mejor tratamiento y el estrés severo (PEG-3) no se compensa con nanopartículas, ya que las plántulas apenas logran desarrollarse. En el trabajo de Sankarmani *et al.* 2023 en plántulas de arroz lograron mejorar la longitud de raíz, altura de plántula y el peso de las plántulas con la aplicación de NPs de CaO a 40 ppm respecto a su tratamiento control, mientras que en el trabajo de Ertuğ y Yazıcılar, 2023, encontraron que las NPs de CaO a concentraciones de 0.5 y 1.5 ppm no tuvieron un efecto significativo favorable en las variables de longitud de raíz y diámetro de tallo en plántulas de *Onobrychis viciifolia*, datos similares a los encontrados en este trabajo. Por su parte el trabajo realizado por De la Vega *et al.* 2020 en su trabajo en el cultivo frijol aplicando NPs de hidroxiapatita a concentraciones de 250 no encontraron diferencias en el diámetro de radícula respecto a su control, pero en dosis más altas de hasta encontraron valores que beneficiaron esta variable, manteniendo esta tendencia en la longitud radical los cuales son datos similares a los obtenidos en este trabajo.

8. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que el porcentaje de germinación del chile piquín se ve favorecida cuando se combina el estrés osmótico de PEG-1500 con las diferentes nanopartículas de carbonato y CaSO_4 250 mg/L, al igual que otros parámetros se vieron favorecidos como el tiempo medio de germinación y el porcentaje de germinación relativo. Respecto a los parámetros en plántula el peso seco mostró un efecto positivo al combinar ambos tipos de nanopartículas de calcio con estrés osmótico de -0.5 bar. También se recomienda trabajar dosis de nanopartículas en un rango más amplio para poder definir recomendaciones concretas y mantener una buena germinación y un buen desarrollo de plántulas que se ven afectadas por estrés hídrico.

9. LITERATURA CITADA

Aguilar-Meléndez, A. 2004. Ethnobotany, classification and distribution of *Capsicum annuum* L. in Mexico. En Pozo C., O. (ed) Primera Convención Mundial del Chile 2004, Memorias. León, Gto., México. pp. 419-421.

Aguilar-Rincón, V. H., T. Corona Torres, P. López López, L. Latournerie Moreno, M. Ramírez Meraz, H. Villalón Mendoza y J. A. Aguilar Castillo. (2010). Los chiles de México y su distribución. SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, IT-Conkal, UANL, UAN. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 114 p.

Andleeba Jan Syed, Shakeel Asma, Mumtaz Ishrat, Khan Inayat, Bhat Javid, Lone Aabid and Shakeel Mehnaz. (2024). Introduction to Nanobiostimulants in Sustainable Agriculture. Nanobiostimulants. 10.1007/978-3-031-68138-7_1.

Association of Official Seed Analysts (AOSA). (1983). Seed vigor testing handbook. Contribution No. 32. U.S.A. 82 p.

Ayyaz Ahsan, Fang Rouyi, Ma Junyi, Hannan Fakhir, Huang Qian, Habib Habib Ur Rahman, Sun Yongqi, Javed Muhammad, Ali Shafaqat, Zhou Weijun and Farooq Muhammad Ahsan. (2022). Calcium nanoparticles (Ca-NPs) improve drought stress tolerance in *Brassica napus* by modulating the photosystem II, nutrient acquisition and antioxidant performance. *NanoImpact*. 28. 100423. 10.1016/j.impact.2022.100423.

Azimi Reyhaneh, Farzam Mohammad, Feizi Hassan and Azimi Amin. (2014). Interaction of SiO₂ Nanoparticles with Seed Prechilling on Germination and Early Seedling Growth of Tall Wheatgrass (*Agropyron Elongatum* L.). *Polish Journal of Chemical Technology*. 10.2478/pjct-2014-0045.

Bache B. W. (2006). The role of calcium in buffering soils. *Plant, Cell & Environment*. 7.(6): 391 - 395. 10.1111/j.1365-3040.1984.tb01428.x.

Bansal Khushboo, Hooda Vikas, Verma Neelam, Kharewal Tannu, Tehri Nimisha, Dhull Vikas and Gahlaut Anjum. (2022). Stress Alleviation and Crop Improvement Using Silicon Nanoparticles in Agriculture: a Review. *Silicon*. Springer Nature. 14. 1-14. 10.1007/s12633-022-01755-y.

Barros, C. y M. Buenrostro. 2002. Recetario de la cocina prehispánica. Revista Arqueología Mexicana. Editorial Raíces, México, D.F. 101 p.

Beegum Sahila and Das Saurav. (2022). Nanosensors in agriculture. *Agricultural Nanobiotechnology*. 10.1016/B978-0-323-91908-1.00012-2.

Begna Temesgen. (2021). Impact of drought stress on crop production and its management options. *International Journal of Research in Agronomy*. 4. 66-74. 10.33545/2618060X.2021.v4.i2a.103.

Bewley, J.D., Bradford, K.J., Hilhorst, H.W.M., Nonogaki, H., 2013. *Seeds Physiology of Development, Germination and Dormancy*. 3rd Edition. Springer, New York, NY. Briat, J.-F., Curie, C., Gaymard, F., 2007. Iron utilization and metabolism in plants. *Curr. Opin. Plant Biol.* 10, 276–282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pbi.2007.04.003>.

De la Vega García Nefertiti, Valdivia Cecilia, Gonzalez Chavez Ma. del Carmen, Chacon Daniel y Carrillo González Rogelio. (2020). Síntesis y efecto de nanopartículas de hidroxapatita en la germinación y crecimiento de frijol. *Agrociencia*. 54. 1009-1029. 10.47163/agrociencia.v54i8.2299.

Ertuğ Mehmet and Yazıcılar Büşra. (2023). CaO nanoparticle enhances the seedling growth of *Onobrychis viciifolia* under drought stress via mannitol use Abbreviations NPs Nanoparticles Ca²⁺ CaO MDA Malondialdehyde H₂O₂ Hydrogen peroxide SEM Scanning Electron Microscopy ROS Reactive oxygen species MS Murashige and Skoog 2,4-D 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid. *Biologia*. 78. 3. 10.1007/s11756-023-01313-w.

Faraji Javad & Sepehri, Ali. (2019). Ameliorative effects of TiO₂ nanoparticles and sodium nitroprusside on seed germination and seedling growth of wheat under PEG-stimulated drought stress. *Journal of Seed Science*. 41. 309-317. 10.1590/2317-1545v41n3213139.

Feizi, H., Rezvani Moghaddam, P., Shahtahmassebi, N., Fotovat, A., 2012. Impact of bulk and nanosized titanium dioxide (TiO₂) on wheat seed germination and seedling growth. *Biol. Trace Elem. Res.* 146, 101–106. <http://dx.doi.org/10.1007/s12011-011-9222-7>.

Ghormade V., Deshpande M.V., and Paknikar K.M. (2011). Perspectives for nanobiotechnology enabled protection and nutrition of plants. *Biotechnol. Adv.* 792–803.

Gong, Z., Xiong, L., Shi, H., Yang, S., Herrera-Estrella L.R., Xu G., Chao D.-Y., Li J., Wang P.-Y., Qin, F. (2020). Planta abiótica Respuesta al estrés y eficiencia en el uso de nutrientes. *Sci. China Life Sci.* 63, 635–674.

Harshit Mishra. (2024). Nanobiostimulants and Precision Agriculture: A Data-Driven Approach to Farming and Market Dynamics. *Nanobiostimulants*. 10.1007/978-3-031-68138-7_16.

Hasanuzzaman Mirza, Nahar Kamrun, Fujita Masayuki, Ahmad Parvaiz, Chandna Ruby, Majeti Prasad and Ozturk Munir. (2014). Potential use of halophytes to remediate saline soils. *BioMed Research International*. 10.1007/978-1-4614-6108-1_6.

Hernández V., S., P. Dávila A. y K. Oyama. 1999. Síntesis del conocimiento taxonómico, origen y domesticación del género *Capsicum*. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 64: 65-84.

Kalia A. and Kaur H (2019). Nano-biofertilizers: Harnessing dual benefits of nano-nutrient and bio-fertilizers for enhanced nutrient use efficiency and sustainable productivity. In *Nanoscience for sustainable agriculture*. Springer. pp. 51-73.

Kaushal Manoj and Wani Suhas. (2017). Nanosensors: Frontiers in Precision Agriculture. *Springer Nature Singapore Pte Ltd* 10.1007/978-981-10-4573-8_13.

Koca Fatih, Nadaroglu Hayrunnisa, Kaymak Haluk, Kaska Mustafa and Alayli Azize. (2021). Potential Effects of CaO Nanoparticles on Germination of Common Bean Under Salinity Stress. *Proceedings of the 4th International Symposium on Advanced Materials and Nanotechnology*. 1-3.

Kopecká Romana, Kameniarová Michaela, Cerny Martin, Brzobohatý Břetislav, Novák Jan (2023). Abiotic Stress in Crop Production. *International Journal of Molecular Sciences*. 24. 6603. 10.3390/ijms24076603.

Kumar Yogendra, Tiwari K., Singh Tarunendu and Raliya Ramesh. (2021). Nanofertilizers and their role in sustainable agriculture. *Annals of Plant and Soil Research*. 23(3). 238-255. 10.47815/apsr.2021.10067.

Laborde, C. y O. Pozo C. (comps). 1982. Presente y pasado del chile en México. Pú. Especial No. 85. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D.F. 82 p.

Lahuta Lesław, Szablińska-Piernik Joanna, Glowacka Katarzyna, Stałanowska Karolina, Railean Viorica, Horbowicz Marcin, Pomastowski Paweł and Buszewski Bogusław. (2022). The Effect of Bio-Synthesized Silver Nanoparticles on Germination, Early Seedling Development, and Metabolome of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Molecules*. 27. 2303. 10.3390/molecules27072303.

Liu, R. and Lal R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Sci. Total Environ*. 514, 131–139.

Long S., J., M. Álvarez y A. Camarena. 1999. Alimentos de México, el placer del chile. Editorial Clío, 2da edición, México, D.F. pp 9-94.

López-Martínez Guadalupe, Ruiz-Torres Norma, Diaz-Barriga-Castro Enrique, Lira-Saldivar Ricardo, López-Hernández Isaías, Luna-Anguiano Jesús y Flores-

Hernández Eduardo. (2023). Efecto de nanopartículas de hidroxiapatita en el desarrollo y germinación de *Cucumis Sativus* L.. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 10. 10.19136/era.a10nNEIII.3608.

Magdaleno-García, Guadalupe & Méndez-López, Alonso. (2023). Nanotecnología en la agricultura: pequeñas soluciones para grandes desafíos. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. 1. 59-64.

Manikandan Angamuthu, Subramanian K., Arulmozhiselvan K., Natarajan Nagappan, Amanullah M., Deshmukh Rachana and Blaise Desouza. (2022). Nanofertilizer Nitrogen Formulations for Enhancing Use Efficiency: A Review. 10.47114/j.agroped.2022.Jun1.

Manjunatha S B., Biradar D., and Aladakatti Yallappa. (2016). Nanotechnology and its applications in agriculture: A review. *Journal of Farm Sciences*. 29. 1-13.

Martínez A.J.G., Venegas B.C.S., Martínez G.R., Torres C.J.A., Olazarán S.F.E., Mora O.A., Guerra P.A., Arellano M.L.U., Garza O.F. (2018). Review on the Geographical Distribution, Fruit Production and Concentration of Capsaicinoids in *Capsicum annum* var. *glabriusculum* in the Northeastern Region of Mexico. Preprints.org, 2018110517.

Ma, Yali, Zhang Jinghua, Li Xiaorong, Zhang Shiyue and Lan Haiyan. (2016). Effects of environmental stress on seed germination and seedling growth of *Salsola ferganica* (Chenopodiaceae). *Acta Ecologica Sinica*. 36. 456-463. 10.1016/j.chnaes.2016.09.008.

Mohusaien R., Shibli R., Abu-Zurayk R., Tahtamouni R., and Al-Qudah T. S. (2024). Silver nanoparticles enhance the mitigation of osmotic stress in *Chenopodium quinoa* microshoots grown under in vitro osmo-stressing conditions. *Journal of Biology*. 1678.4375. Vol. 84, e286851. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.286851>.

Munns, R. and Tester M. (2008). Mecanismos de tolerancia a la salinidad. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59, 651–681.

Nazeer Ayesha, Ahmad Faisal and Ahmad Shamim. (2023). Nanofertilizers in Agriculture. Targeted Delivery of Nanopesticides and Nanofertilizers in Sustainable Agricultural Farming. 10.1007/978-3-031-41333-9_5.

Nejatzadeh, Fatemeh. (2021). Effect of silver nanoparticles on salt tolerance of *Satureja hortensis* L. during in vitro and in vivo germination tests. *Heliyon*. 7. e05981. 10.1016/j.heliyon.2021.e05981.

Oktem Huseyin, Eyidoğan Füsün, Selçuk Feyza, Teixeira da Silva Jaime and Yücel Meral. (2006). Osmotic Stress Tolerance in Plants: Transgenic Strategies. Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology: Advances and Topical Issues Vol III. Edition: 1. Chapter: 21. Publisher: Global Science Books.

Ondrasek Gabrijel, Rathod Santosha, K, Manohara, Gireesh Channappa, Anantha M., Sakhare Akshay, Parmar Brajendra, Yadav Brahamdeo, Bandumula Nirmala, Raihan Farzana, Zielińska-Chmielewska Anna, Meriño-Gergichevich Cristian, Reyes-Díaz Marjorie, Khan Amanullah, Panfilova Olga, Seguel Alex, Meier Sebastian, Beithou N., Wan Chunpeng and Horvatinec Jelena. (2022). Salt Stress in Plants and Mitigation Approaches. *Plants*. 11. 717. 10.3390/plants11060717.

Oshunsanya Suarau, Nwosu Nkem, Li Yong. (2019). Abiotic Stress in Agricultural Crops Under Climatic Conditions. *Sustainable Agriculture, Forest and Environmental Management*. 10.1007/978-981-13-6830-1_3.

Pariona Nicolaza, Martínez Arturo I., Hernandez-Flores Homero, Clark-Tapia Ricardo. (2017). Effect of magnetite nanoparticles on the germination and early growth of *Quercus macdougalii*. *Science of The Total Environment*. Volume 575. Pages 869-875. ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.128>.

Pedraza Robles Laura y Gómez Gómez Alma. (2008). Análisis exploratório del mercado y la comercialización de chile piquín (*C. annum*, var. *aviculare* Dierb.) en México. Tecsisotecatl.

Prasad Rajendra and Shivay Yashbir. (2020). Calcium as a Plant Nutrient. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*. 11. i-iii. 10.23910/1.2020.2075a.

Quezada Keiry, Ramírez Francisco, Muñoz Silvia, Soto Juan y Muñoz Rosa. (2023). Chile Piquín (*Capsicum annuum* var. *Glabriusculum*) Tesoro Picante de la Naturaleza. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*. 11. 18-23. 10.47808/revistabioagro.v11i2.485.

Ramírez-Meraz, M., O. Pozo-Campodónico y L. A. Rodríguez del Bosque. (2003). Tecnología para inducir la germinación en chile piquín. En Rodríguez del Bosque, L. A. (ed). Memoria del Primer Simposio de Chile Piquín. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro de Investigación Regional del Noreste, Campo Experimental Río Bravo. Publicación Especial Num. 26. Río Bravo, Tamps., México. pp. 35-36.

Ramírez N.U., Cervantes O.F., Montes H.S., Raya P.J., Cibrián J.A. y Andrio, E.E. (2018). Diversidad morfológica del chile piquín (*Capsicum annuum* L. var. *Glabriusculum*) de Querétaro y Guanajuato, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 6(9):1159-1170. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i6.1581>.

Ruiz-Torres, Norma & García López, Josué. (2021). Synthesis of hydroxyapatite nanoparticles and its effect on *Raphanus sativus* seedlings. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 8. 1-12. 10.19136/era.a8n1.2747.

Samadi Niloofar, Yahyaabadi Sima and Rezayatmand Zahra. (2014). Effect of TiO₂ and TiO₂ nanoparticle on germination, root and shoot length and photosynthetic pigments of *Mentha piperita*. *Int. J. Plant Soil Sci*. 3. 408-418.

Sánchez, S., Salcedo, S., Mendoza, R., Pinedo, J., y Moreno, S. (2018). Aislamiento e Identificación de Micorrizas Arbusculares (MA) Asociadas a la Rizosfera del chile piquín (*Capsicum annuum* var. *aviculare* L.). *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3, 86-91.

Sankarmani Gopinath, Kalimuthu Raja, Manonmani V., Jeyaprakash Paramasiwam, Ramesh Thanakkan, Vanniarajan C., and Shanmugam Kavitha. (2023). CaO Nanoparticles Seed Invigoration on Germination and Seedling Growth of Rice var. TRY 3. *International Journal of Environment and Climate Change*. 13. 2160-2167. 10.9734/ijecc/2023/v13i102877.

Sanz M.A., Blanco A., Monge E., and Val Jesus. (2001). Caracterización de la deficiencia de calcio en plantas de tomate utilizando parámetros fisiológicos. *Información técnica económica agraria*. 97. 26-38.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2023). Citado en nube.siap.gob.mx/cierreagricola/.

Soni Kiran, Sharma Yashpal, Sharma Shalini, Sharma Amita, Rani Amisha, Rathi Abhinav, Kapoor Dr and Naik S. Balaji. (2024). Nanobiostimulants and Plant Secondary Metabolites. *Biostimulants*. 10.1007/978-3-031-68138-7_12.

Torres C., R. 2000. Las flores en la cocina mexicana. Cocina indígena y popular 22. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. México, D.F. p 15.

Upadhyay V. K., Chitara M. K., Mishra D., Jha M. N., Jaiswal A., Kumari G., Ghosh S., Patel V. K., Naitan M. G., Singh A. K., and Pareek N. (2023). Synergistic impact of nanomaterials and plant probiotics in agriculture: A tale of two-way strategy for long-term sustainability. *Frontiers in Microbiology*. 14. 1133968.

Verma Praveen, Bodh Suman and Thakur Shivender. (2020). Nanotechnology in agriculture: A review. *International Journal of Chemical Studies*. 7(4): 488-491.

Wang Jiyue, Xu Jiajun, Yang Mingli and Miao Mingzhi. (2023). Influence of SiO₂, Al₂O₃ and TiO₂ nanoparticles on okra seed germination under PEG-6000 simulated water deficit stress. *Journal of Seed Science*. 45. 10.1590/2317-1545v45274866.

Wang^b Lung-Shuo, Wang Chih-Yu, Yang Chih-Ying, Hsieh Chen-Ling, Chen Szu-Yu, Shen Chi-Yen, Wang Jia-Jung and Huang Keng-Shiang. (2015). Synthesis and

anti-fungal effect of silver nanoparticles–chitosan composite particles. *International Journal of Nanomedicine*. 10. 2685-96. 10.2147/IJN.S77410.

White Philip and Broadley Martin. (2003). Calcium in Plants. *Annals of botany*. 92. 487-511. 10.1093/aob/mcg164.

Yadav Anurag, Yadav Kusum and Abd-Elsalam Kamel. (2023). Nanofertilizers: Types, Delivery and Advantages in Agricultural Sustainability. *Agrochemicals*. 2. 296-336. 10.3390/agrochemicals2020019.

Yu Bo, Chao Dai-Yin and Zhao Yang. (2024). How plants sense and respond to osmotic stress. *Journal of Integrative Plant Biology*. 66. 10.1111/jipb.13622.

Yugandhar Pulicherla & Savithramma N. (2013). Green synthesis of calcium carbonate nanoparticles and their effects on seed germination and seedling growth of *Vigna mungo* (L.). Hepper. *International Journal of Advanced Research*. 1. 89-103.

Zhou Chengshuang, Oh Jinwon, Stone Michael, Richardson Sydney, Chung Pin-Hung, Osio-Norgaard Jorge, Nhan Bang, Kumar Abinash, Chi Miaofang and Cagnello Matteo. (2024). A General Approach for Metal Nanoparticle Encapsulation Within Porous Oxides. *Advanced Materials*. 36. 10.1002/adma.202409710.

Zhao^b L., Lu L., Wang A., Zhang H., Huang M., Wu H., and Ji R. (2020). Nanobiotechnology in agriculture: Use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 68. 1935-1947.