

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Efectos de los Nanotubos de Carbono y Ácido Giberélico en la Germinación y
Desarrollo de Plántulas de Brócoli (*Brassica oleracea*)

Por:

RAÚL GERARDO OBREGÓN DE LA PEÑA

TESIS

Presentada como requisito parcial para recibir el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Efectos de los Nanotubos de Carbono y Ácido Giberélico en la Germinación y
Desarrollo de Plántulas de Brócoli (*Brassica oleracea*)

Por:

RAÚL GERARDO OBREGÓN DE LA PEÑA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

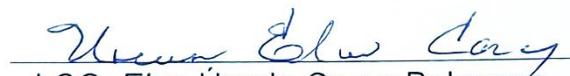
INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

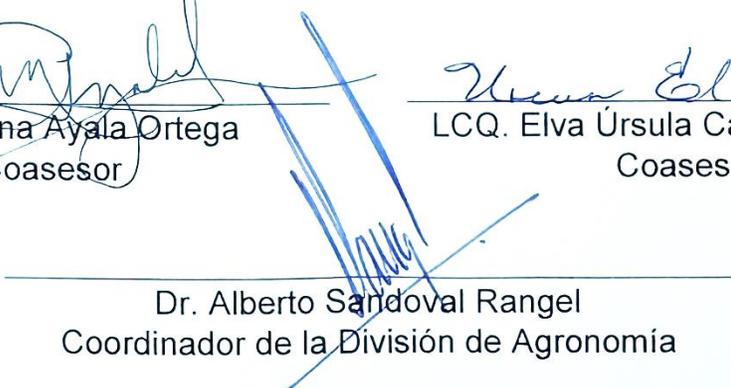
Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dra. Norma Angélica Ruíz Torres
Asesor Principal


Dra. Ileana Vera Reyes
Asesor Principal Externo


M.C. Myrna Ayala Ortega
Coasesor


LCQ. Elva Úrsula Casar Belmares
Coasesor


Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2024

DERECHO DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

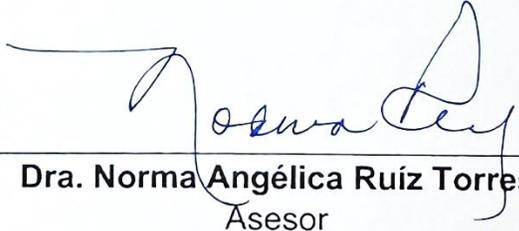
Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

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



Raúl Gerardo Obregón de la Peña
Autor



Dra. Norma Angélica Ruíz Torres
Asesor

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2024

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, cuyo respaldo académico y técnico ha sido fundamental para la realización de esta tesis; en especial al Departamento de Fitomejoramiento y al Laboratorio de Fisiología de Semillas, donde se desarrolló gran parte de este proyecto y por brindarme las instalaciones y el apoyo necesario para llevar esta investigación a cabo.

A mi asesora de tesis, la Dra. Norma Ruiz Torres, le agradezco por su paciencia, su orientación, experiencia y valiosos comentarios a lo largo de todo el proceso, que fueron fundamentales para el desarrollo y conclusión de esta tesis.

Agradezco a mis profesores que a través de sus enseñanzas me compartieron conocimientos teóricos, prácticos y lecciones de vida. Por sus consejos y su apoyo para guiarme a alcanzar mis metas.

Agradezco a todos mis amigos por su amistad, sus enseñanzas, todos los momentos, su apoyo, sus ánimos y por su comprensión.

A mis padres Marcela de la Peña García y Raúl Gerardo Obregón Aguirre, y a mi hermana Valeria por su motivación, su apoyo y por creer en mí, sobre todo, por la educación que me brindaron.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis compañeros y a todos aquellos quienes me apoyaron durante mi trayecto en la universidad.

Gracias a todos por haber sido parte de este tiempo.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis en primer lugar a mis padres, quienes han sido mi mayor fuente de inspiración, apoyo y fortaleza. Su amor, su paciencia y sus sacrificios me han permitido llegar hasta aquí. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, por siempre creer en mí y por estar a mi lado en cada paso de este camino.

A mis amigos, que, con su compañía, ánimo y constante apoyo, han hecho que este proceso sea mucho más emocionante. Su amistad ha sido un aspecto muy importante en mi vida.

Finalmente dedico este logro a todas aquellas personas que de alguna manera me han impulsado a no rendirme, a seguir persiguiendo mis sueños y a luchar por mis objetivos.

Esta tesis es el resultado del esfuerzo de todos aquellos que han creído en mí y me han apoyado en este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	3
HIPÓTESIS	4
REVISIÓN DE LITERATURA	5
Ácido Giberélico	5
Nanotecnología y Nanotubos de Carbono	8
MATERIALES Y MÉTODOS	13
Análisis Estadístico del Bioensayo	18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
CONCLUSIONES	29
LITERATURA CITADA	31

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1

Cuadrados medios del análisis de varianza para variables evaluadas en laboratorio	20
---	----

Cuadro 2

Cuadrados medios del análisis de varianza para variables evaluadas en laboratorio	22
---	----

Cuadro 3

Comparación de medias de variables evaluadas en laboratorio en brócoli tratado con AG ₃	25
--	----

Cuadro 4

Comparación de medias de variables evaluadas en laboratorio en brócoli tratado con NTC	28
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1

Tratamientos evaluados en semillas peletizadas de brócoli.....	15
--	----

RESUMEN

La nanotecnología (NT) forma parte de las innovaciones y el desarrollo de nuevas tecnologías y herramientas, las cuales han beneficiado a los sectores en donde son utilizadas. En los últimos años la investigación y el uso de la NT en la agricultura han ido en aumento a un ritmo elevado, lo cual contribuye al sector acrecentando la cantidad de las cosechas, al igual que mejorando su calidad. Este avance tecnológico le proporciona nuevos beneficios al sector agrícola, por ejemplo, en el control de enfermedades, y en la absorción de nutrientes, entre otros.

Esta investigación se realizó con el objetivo de evaluar las reacciones que generan los nanotubos de carbono (NTC) y el ácido giberélico (AG_3), al ser aplicados en semillas de brócoli (*Brassica oleracea*) en distintas concentraciones, y determinar si los efectos favorecen o causan toxicidad, así como definir la dosis idónea para su uso en el tratamiento de estas semillas, para obtener plántulas de mayor calidad, vigor y un alto porcentaje de establecimiento en campo.

El experimento se realizó en el Laboratorio de Fisiología de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTS), del Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila.

Se utilizó semilla de brócoli (*Brassica oleracea*) peletizada, aplicando 15 tratamientos, cada uno con cuatro repeticiones de 25 semillas, estableciendo un total de 1,500 semillas, en un diseño experimental completamente al azar.

Los resultados indican que la aplicación de nanotubos de carbono (NTC), en una concentración de 25 ppm a semillas de brócoli mejora el vigor al incrementar el porcentaje de plántulas con alto vigor y favorecer el crecimiento de la plúmula y de la radícula. Aunque el ácido giberélico (AG₃) mostró efectos limitados por sí solo, los NTC sin combinación demostraron ser de gran ayuda para optimizar el establecimiento de cultivos. Esto sugiere que los NTC y el AG₃ pueden ser herramientas útiles en la producción agrícola, aunque se requieren estudios adicionales en condiciones de campo.

Palabras clave: Nanotecnología, Nanotubos de carbono, Ácido giberélico, plántula, semilla.

INTRODUCCIÓN

En México se produjeron 632,258 toneladas de brócoli en 2022, de acuerdo con datos del Anuario Estadístico de la Producción Agrícola del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2023). Siendo Guanajuato el Estado con mayor volumen de producción (65.3 %), seguido por Puebla (7.5%), Michoacán (4.5%) y Sonora (4.5%). A nivel mundial el país obtuvo el 5° lugar de los países productores de brócoli. El cliente principal es Estados Unidos, seguido de Canadá, Japón, Taiwán, entre otros.

Una de las tecnologías utilizadas para la mejora de calidad y tamaño de frutos es el uso de reguladores de crecimiento como son las giberelinas y citoquininas.

El ácido giberélico (AG_3) es una fitohormona que desempeña un papel esencial en la germinación de las semillas incrementando la hidrólisis del almidón, fructanos y sacarosa, asimismo promoviendo el crecimiento y el desarrollo de las plántulas. Según Taiz y Zeiger (2010), esta hormona facilita la activación de enzimas durante las primeras etapas de la germinación.

La aplicación de AG_3 en las semillas puede acelerar el proceso de germinación, reduciendo el tiempo necesario para la emergencia de las plántulas y aumentando la tasa de germinación (Davies, 2010). Esto permite obtener un mayor número de plantas vigorosas y uniformes, lo cual es fundamental en la producción agrícola, ya que se busca un establecimiento eficiente de los cultivos en el campo.

En cultivos como el brócoli (*Brassica oleracea*), la aplicación de ácido giberélico puede ser determinante para acelerar la germinación, ya que promueve tanto la elongación del tallo como el desarrollo de las raíces, favoreciendo un crecimiento equilibrado de las plántulas (Salisbury y Ross, 1992). Este proceso ayuda a que las plantas se establezcan más rápidamente en las condiciones del campo, mejorando su calidad y rendimiento. Sin embargo, es necesario ajustar de manera adecuada la dosis de AG₃, ya que concentraciones excesivas pueden generar efectos negativos como la toxicidad en las plántulas (Arteca, 1996).

Por otra parte, los nanotubos de carbono (NTC) son estructuras cilíndricas a escala nanométrica, compuestas principalmente de átomos de carbono. Estas nanopartículas han demostrado un gran potencial en diversos campos, incluyendo la agricultura debido a sus propiedades, como la alta resistencia, conductividad eléctrica y su capacidad para interactuar con otros compuestos de manera eficiente (Dresselhaus *et al.*, 2000).

Uno de los principales usos de los NTC en la agricultura es su aplicación en el tratamiento de semillas. Los estudios de Khodakovskaya *et al.* (2011) y de Zhang *et al.* (2015), han mostrado que los NTC pueden mejorar la germinación y el crecimiento de las plántulas. En el ámbito agrícola los NTC se están explorando como herramientas para mejorar la producción y el desarrollo de los cultivos.

En este trabajo se aplicaron diferentes dosis de NTC y de AG₃, en semillas peletizadas de brócoli, para analizar los efectos sobre la germinación y el vigor de las plántulas.

OBJETIVOS

Objetivo General

Analizar el efecto de los NTC y del AG₃ en el proceso de germinación de semillas peletizadas de brócoli, evaluar el crecimiento del tallo y de la raíz, y determinar la acumulación de biomasa en plántulas.

Objetivos Específicos

Conocer la respuesta de la germinación de semillas peletizadas de brócoli, a la aplicación de AG₃ y de NTC en suspensión durante la fase de imbibición.

Determinar si la aplicación de NTC en las semillas promueve el vigor y por lo tanto el desarrollo y la acumulación de biomasa en plántulas de brócoli.

Identificar si alguno de los tratamientos en estudio genera toxicidad, afectando la germinación y/o el vigor de las plántulas de brócoli.

Identificar la dosis adecuada para ser utilizada como promotor de la germinación y el vigor en semillas peletizadas de brócoli.

HIPÓTESIS

H_i: La aplicación de NTC y de AG₃ en semillas peletizadas de brócoli aumenta el porcentaje de germinación, el desarrollo del tallo y de las raíces, y la biomasa.

H_o: La aplicación de NTC y de AG₃ en semillas peletizadas de brócoli no aumenta el porcentaje de germinación, ni mejora el desarrollo del tallo y de las raíces, ni la biomasa.

REVISIÓN DE LITERATURA

Ácido Giberélico

El ácido giberélico (AG_3) es una fitohormona que forma parte del grupo de las giberelinas, la cual tiene un papel crucial en varios procesos de crecimiento y desarrollo vegetal. En la mayoría de las plantas, las giberelinas están fuertemente asociadas con la elongación del tallo, lo que significa que su aplicación favorece el desarrollo de plantas con mayor altura (Taiz y Zeiger, 2010). El AG_3 está relacionado promueve la división y expansión celular, lo que resulta en tallos más largos (Davies, 2010).

Sin embargo, la principal función del AG_3 es la promoción de la germinación de las semillas al estimular la síntesis de enzimas (α y β -amilasas) que descomponen reservas como el almidón, proporcionándole energía al embrión para que comience el crecimiento (Davies, 2010). Después de la degradación del almidón y los productos de la digestión almacenados en la aleurona, estos son movilizados al escutelo para iniciar el crecimiento de las plántulas (Azcón-Bieto & Talón, 2000).

El AG_3 posee más de un sitio de acción en la estructura de la semilla y está estrechamente relacionado con la terminación de la latencia del embrión, también altera la membrana celular incrementando su permeabilidad (Abou-Quad, 2007), esta fitohormona aumenta la extensibilidad y la tensión de relajación de la pared celular, debilitando la capa del endospermo y movilizando las reservas en el endospermo (Taiz & Zeiger, 2006)

De acuerdo con Taiz y Zeiger 2010, el AG₃ ha demostrado ser una herramienta eficaz para superar la dormancia en semillas de cultivos de difícil germinación. Al romper la dormancia fisiológica, el AG₃ permite que las semillas germinen en condiciones donde normalmente no es viable, como bajas temperaturas o falta de luz adecuada. Esto beneficia a la agricultura aplicada en regiones con condiciones climáticas adversas, donde la aplicación de esta hormona puede optimizar y asegurar el rendimiento de los cultivos al mejorar su capacidad de adaptación y establecimiento en el campo.

En un trabajo realizado por Deaquiz-Oyola & Burgos-Ávila (2013), encontraron que la imbibición de las semillas de tomate variedad Santa Clara en Ag₃ en concentraciones de 100, 200 y 400 mg L⁻¹ durante 24 horas, afectó negativamente el proceso de germinación, ya que se obtuvo un menor porcentaje de germinación y de velocidad media de germinación, así como un mayor tiempo medio de germinación. Indicando que se debe usar en concentraciones menores a 100 mg L⁻¹. Los resultados anteriores contrastan con los reportados por Fraile-Robayo *et al.*, (2012), quienes encontraron que la aplicación de AG₃ (400 mgL⁻¹) en semillas de tomate presentó una germinación del 100 % en comparación con el testigo, además de menor tiempo medio de germinación y mayor velocidad media de germinación.

Gil & Miranda (2008) encontraron que concentraciones elevadas de AG₃ tienen un efecto fitotóxico en semillas de papaya. De igual manera Cervantes-Olvera *et al.* (2010) y Amador-Alfarez (2013), observaron en cactáceas efecto inhibitorio sobre la germinación con la aplicación de GA₃ (Rojas-Aréchiga, 2007).

El AG₃ también se utiliza para mejorar el cuajado de frutos en especies con un bajo número de óvulos, como el melón y la cereza, ayudando a incrementar la producción de frutos. En aplicaciones agrícolas, el AG₃ es esencial para aumentar el rendimiento de los cultivos. Se ha observado que su aplicación controlada en diferentes cultivos permite obtener plantas más vigorosas y mejor adaptadas a las condiciones del campo donde son establecidos (Salisbury y Ross, 1992). En cultivos como el tomate y chiles, mejora la calidad y el tamaño de los frutos al regular la división celular y el transporte de nutrientes. En cuanto a la floración, el AG₃ induce a la floración en plantas de día corto, favoreciendo una cosecha más uniforme. En condiciones de estrés, también ayuda a las plantas a adaptarse, como a la salinidad y la sequía, mejorando la absorción de agua y nutrientes en cultivos como la espinaca y la lechuga (Aziz y Peksen, 2020; Amri *et al.*, 2016).

Esta hormona tiene también efectos positivos en el crecimiento y desarrollo de las hortalizas. La capacidad para promover la elongación del tallo es uno de los principales efectos, lo cual permite generar mayor soporte y con ello mayor altura. Este tipo de elongación es particularmente beneficiosa en cultivos como el brócoli, lechuga y tomates, en donde se busca una mayor producción de biomasa (Ahmad *et al.*, 2021).

González *et al.* (2007) reportaron que en la coliflor (*Brassica oleraceae* L.), una dosis de 25 mg L⁻¹ de AG₃, fue la más apropiada para obtener mayor altura de planta, mientras que la dosis de 5 mg L⁻¹ de AG₃ permitió acumular mayor cantidad de biomasa.

Rademacher (2000) indicó que el estímulo de crecimiento de las plantas por parte del ácido giberélico se debe al cambio en la polaridad del crecimiento de la célula, provocando la alineación transversal de los microtúbulos corticales, que median con la deposición transversal de las microfibrillas de la membrana celular, además, se origina la ampliación de la célula, debilitando la pared celular, cambiando la presión dentro de la célula.

Además, el ácido giberélico tiene un papel importante en la fisiología pos cosecha de las frutas y hortalizas. Recientemente diversos estudios han demostrado que su aplicación retrasa la madurez de estos, aumentando la calidad de vida de anaquel al reducir la respiración y por ende la producción de etileno, además mejora la firmeza de los frutos. Este efecto es ampliamente esencial para prolongar la vida útil de los productos hortícolas, manteniendo su calidad interna y externa durante el almacenamiento (He *et al.*, 2023).

Nanotecnología y Nanotubos de Carbono

La nanotecnología (NT) tiene aplicaciones significativas en la agricultura, ofreciendo ventajas como mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes, el control de plagas y enfermedades y la reducción del uso de agroquímicos. Sin embargo, también existen riesgos como la toxicidad para las plantas y el medio ambiente, dependiendo de la concentración y el tipo de nanopartículas utilizadas.

Aunque los beneficios son favorables, es necesario investigar los efectos a largo plazo para asegurar la sostenibilidad en el ámbito agrícola (Kumar *et al.*, 2018). Los nanotubos de carbono (NTC) son estructuras cilíndricas formadas por átomos de carbono, organizados en redes hexagonales, lo que les otorga una gran resistencia y conductividad eléctrica. Debido a sus propiedades, los NTC se han aplicado en diversos ámbitos, entre ellos, la agricultura.

Los NTC constituyen una clase de nanomateriales con propiedades químicas, físicas, eléctricas, mecánicas y térmicas únicas, por lo cual pueden ser utilizados en aplicaciones en diversas áreas (He *et al.*, 2013; Caoduro *et al.*, 2016).

En la agricultura, los NTC se utilizan principalmente para mejorar la germinación de semillas, mejorar el crecimiento de las plantas y la eficiencia en la absorción de nutrientes. Estas nanopartículas pueden interactuar con las semillas y las plantas de diversas formas, facilitando una germinación más rápida y un crecimiento más vigoroso. Además, los NTC pueden actuar como transportadores de nutrientes o pesticidas, lo que permite una liberación más controlada y eficiente en comparación con los métodos convencionales (Khodakovskaya *et al.*, 2011).

Uno de los efectos clave de los NTC en la agricultura, es su capacidad para mejorar la absorción de nutrientes a través de las raíces, lo que incrementa la eficiencia del uso de fertilizantes. Esto no solo ayuda en la disminución de uso de fertilizantes requeridos y en ahorro económico, sino que también minimiza el impacto ambiental de las prácticas agrícolas intensivas. Estudios han demostrado que los NTC pueden aumentar el desarrollo de raíces y crecimiento de biomasa, lo que genera un mayor rendimiento en cultivos como el tomate y el maíz (Tripathi *et al.*, 2017).

Así como el AG₃, los NTC igualmente mejoran la resistencia de las plantas a condiciones de estrés abiótico como la sequía y la salinidad. Al favorecer la absorción de agua y al mejorar el desarrollo radicular, las plantas tratadas con NTC muestran una mayor tolerancia a ambientes complicados, lo que es de gran utilidad en suelos pobres o en zonas con condiciones climáticas adversas (Khodakovskaya *et al.*, 2013). Pandey *et al.* (2018) concluyeron que aplicaciones de grafeno y NTC a semillas de sorgo y de pasto varilla (switchgrass) incrementaron la tasa de germinación, en concentraciones entre 50 µg/ml y 200 µg/ml.

Juárez (2020) realizó un trabajo para evaluar el efecto de los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNTs) de origen natural y sintéticos en el desarrollo de plantas tales como *Eysenhardtia polystachya* y *Arabidopsis thaliana*. Los resultados mostraron que a dosis equivalentes los MWCNTs naturales promovieron el desarrollo de *E. Polystachya* y *A. thaliana* al inducir la emergencia temprana de la semilla y el porcentaje de germinación, el área foliar, la biomasa y la arquitectura radical. Por el contrario, los MWCNTs sintéticos afectaron el desarrollo de estas plantas.

La aplicación de los NTC además se ha investigado como herramienta en la agricultura de precisión. Estos pueden actuar como sensores para el monitoreo de las condiciones del suelo y la detección temprana de enfermedades en las plantas. Esto permitiría una intervención rápida y efectiva, optimizando el uso de los recursos y mejorando la salud de los cultivos a largo plazo (Wang *et al.*, 2016).

La NT permite la creación de pesticidas y herbicidas nanoencapsulados, los cuales son más eficientes y menos tóxicos para el medio ambiente. Estos pesticidas pueden dirigirse específicamente a plagas o malezas, reduciendo el uso general de químicos y evitando efectos adversos en otros organismos y en el suelo (Gogos *et al.*, 2012).

En la elaboración de fertilizantes inteligentes las nanopartículas se pueden utilizar para desarrollar fertilizantes de liberación controlada, lo que mejora la eficiencia de la absorción de nutrientes y minimiza la pérdida de nutrientes liberados al medio ambiente. Estos fertilizantes liberan nutrientes de forma gradual, adaptándose a las necesidades específicas del cultivo y reduciendo el riesgo de contaminación (DeRosa *et al.*, 2010).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo de investigación fue realizado en el Laboratorio de Fisiología de Semillas, del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTS), del Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Para verificar la calidad fisiológica de las semillas utilizadas en el estudio, se llevó a cabo una prueba de germinación preliminar, siguiendo estrictos protocolos de asepsia para evitar cualquier tipo de contaminación. Esta prueba se realizó sembrando en papel Anchor en forma de taco como medio de cultivo, lo que permitió observar la capacidad de germinación de las semillas, antes de aplicar evaluar los tratamientos en estudio.

El experimento final se llevó a cabo bajo condiciones controladas, empleando semillas peletizadas de brócoli del híbrido Batavia (*Brassica oleracea*), con las siguientes características: Híbrido precoz, de porte medio, follaje de buena sanidad, produce pellas de tamaño mediano a grande, grano mediano y un color azulado muy atractivo, buena uniformidad a la cosecha, precoz, puede cosecharse antes que otras variedades. Mantiene su forma de pella. Tolera alta densidad de siembra.

Las instalaciones del laboratorio están equipadas con tecnología avanzada para tratar las semillas con nanotubos de carbono (NTC) y con ácido giberélico (AG₃) en diversas concentraciones, asegurando la precisión y el control de las variables críticas del experimento.

Para garantizar la precisión en la preparación de las suspensiones de nanotubos de carbono (NTC) y de ácido giberélico (AG_3), se utilizó una báscula de analítica para pesar las dosis exactas de cada tratamiento. Una vez pesados los NTC y el AG_3 , se agregaron a los tubos tipo Falcon, los cuales fueron aforados a 50 ml de agua destilada, utilizando pipetas de precisión para asegurar una dosificación homogénea. Este enfoque meticuloso fue clave para evitar cualquier variabilidad que pudiera afectar los resultados. Los tubos tipo Falcon con cada tratamiento fueron llevados a un sonicador AS2060B por 20 minutos a temperatura ambiente.

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3×5 , esto es 3 concentraciones de AG_3 y 5 de NTC (Cuadro 1). Cada tratamiento incluyó 4 repeticiones, y en cada repetición consistió en 25 semillas, lo cual permitió evaluar de manera eficiente la interacción entre los nanotubos de carbono (NTC) y el ácido giberélico (AG_3) en las semillas de brócoli. Las semillas se trataron en cajas de Petri de 150 mm de diámetro, cada una con un total de 100 semillas (4 repeticiones de 25 semillas), aplicando 7 ml de cada suspensión de acuerdo con la interacción de tratamientos. Se imbibieron durante un periodo controlado de 24 horas, asegurando una distribución uniforme de las suspensiones sobre la superficie de las semillas, facilitando la absorción de los NTC y del AG_3 . De este modo, se trataron un total de 1,500 semillas con 15 tratamientos (3×5), lo que permitió asegurar la robustez estadística y confiabilidad de los resultados. Los tratamientos se llevaron a cabo siguiendo un protocolo estandarizado para garantizar la reproducibilidad de los resultados.

Figura 1. Tratamientos evaluados en semillas peletizadas de brócoli.

T1	T2	T3	T4	T5
Testigo- Testigo	0 AG₃ - 25 NTC	0 AG₃ - 50 NTC	0 AG₃ - 100 NTC	0 AG₃ - 200 NTC
7 ml	0 - 7 ml	0 - 7 ml	0 - 7 ml	0 - 7 ml
T6	T7	T8	T9	T10
5 AG₃ - 0 NTC	5 AG₃ - 25 NTC	5 AG₃ - 50 NTC	5 AG₃ - 100 NTC	5 AG₃ - 200 NTC
7 ml	3 - 4 ml	3 - 4 ml	3 - 4 ml	3 - 4 ml
T11	T12	T13	T14	T15
10 AG₃ - 0 NTC	10 AG₃ - 25 NTC	10 AG₃ - 50 NTC	10 AG₃ - 100 NTC	10 AG₃ - 200 NTC
7 ml	3 - 4 ml	3 - 4 ml	3 - 4 ml	3 - 4 ml

NTC: 0, 25, 50, 100 y 200 ppm, y AG₃: 0, 5 y 10 ppm.

Este enfoque permitió evaluar de manera exhaustiva la interacción entre los NTC y el AG₃, y su efecto sobre parámetros como el vigor de germinación, el crecimiento de las raíces y de los tallos, y la biomasa de las plántulas.

Transcurridas las 24 horas del periodo de imbibición, las semillas se sembraron entre dos hojas de papel Anchor.

Posteriormente se evaluaron las siguientes variables:

a) *Porciento de vigor de germinación*

Para la evaluación de esta variable se realizó un primer conteo a los cuatro días después de la siembra, en las cuales se identificaron detalladamente las plántulas normales (plántulas con radícula y tallo desarrollado, considerando el tamaño de cada una de sus estructuras por lo menos dos veces la longitud de la semilla), con esta evaluación se determinó el vigor de germinación, la cual fue expresada en porciento, indicando el potencial biológico que posee la semilla para germinar y favorecer el establecimiento rápido y uniforme bajo condiciones de campo.

b) *Porciento de germinación*

Esta variable se evaluó ocho días después de la siembra y consistió en un segundo conteo de plántulas normales, esto es, las que mostraron el potencial de desarrollarse en plantas satisfactorias cuando se establecen bajo condiciones favorables de humedad, temperatura y luz, expresado en porciento.

c) *Porciento de plántulas anormales*

Para esta variable se consideraron como plántulas anormales, todas aquellas que mostraron deformaciones en el desarrollo en alguna de sus estructuras morfológicas (plúmula o radícula), o bien que carecían de las mismas, el resultado se expresó en porciento.

d) *Porcentaje de semillas sin germinar*

Dentro del conteo se consideraron semillas duras o muertas, aquellas que no manifestaron la capacidad de poder germinar, las cuales se contabilizaron para el resultado de esta variable en porcentaje.

e) *Longitud media de plúmula y de radícula*

Para la estimación de la longitud media de plúmula y de radícula, se tomaron todas las plántulas normales de cada tratamiento y repetición, con las cuales se midieron de la base de la plántula hasta la yema apical para la longitud de plúmula y de la base de la planta hasta el ápice de la raíz principal para la longitud de radícula, utilizando tablas de medición con hojas milimétricas. Los resultados obtenidos se expresaron en cm.

g) *Peso seco de plántula*

Una vez determinadas todas las variables anteriores, por cada repetición las plántulas normales fueron colocadas en bolsas de papel de estraza con perforaciones previamente hechas, enseguida se pasaron a una estufa de secado (Riossa H-48), a una temperatura de 72°C por un lapso de 24 horas. Transcurrido el tiempo de las muestras dentro de la estufa de secado, se extrajeron y fueron situadas en un desecador con el fin de evitar que tomaran la humedad del ambiente. Enseguida se pesó cada una de las muestras sobre una balanza analítica AND-HR200 calibrada, para determinar el peso de materia seca expresado en mg/plántula.

Análisis Estadístico del Bioensayo

Los datos de las variables evaluadas en este bioensayo se sometieron a un análisis de varianza para determinar las diferencias estadísticas entre tratamientos. De manera adicional se llevó a cabo una comparación de medias utilizando la Prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), para establecer el orden de eficiencia de los tratamientos. Los análisis estadísticos fueron realizados utilizando paquete estadístico SAS 9.3 (2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con el análisis de varianza para las variables evaluadas en condiciones de laboratorio, revela que las fuentes de variación tratamientos con ácido giberélico (AG_3) y con nanotubos de carbono (NTC), así como su interacción ($AG_3 \times NTC$), presentan diferencias significativas en las variables relacionadas con el vigor y el desarrollo de plántulas (Cuadros 1 y 2).

Para las variables vigor de germinación (VIGOR %) y porcentaje de germinación (GER), los tratamientos con AG_3 y con NTC no mostraron efectos significativos (Cuadro 1). Esto indica que, bajo las condiciones evaluadas, ni el AG_3 ni los NTC, ni su interacción lograron afectar significativamente la expresión del vigor de germinación en las semillas tratadas. Se esperaba que el AG_3 tuviera algún efecto significativo en las variables vigor de germinación y porcentaje de germinación, ya que el uso de hormonas exógenas como el ácido giberélico actúa como promotor de la inducción enzimática, la extensión del embrión, y permite una mejor imbibición de las semillas (Cavusoglu y Sulusoglu, 2015).

Para las variables de plántulas con alto vigor (PAV %) y plántulas con bajo vigor (PBV %), se encontraron efectos estadísticos significativos con una probabilidad del 0.01% en los tratamientos con NTC y en la interacción $AG_3 \times NTC$. La significancia observada en NTC y en la interacción $AG_3 \times NTC$ implica que los nanotubos de carbono influyen el vigor de las plántulas, por lo que podría atribuirse a la capacidad de los NTC para modificar la absorción del agua y nutrientes durante la germinación.

Para la variable de plántulas anormales (PA %), no se detectaron efectos significativos en ninguna de las fuentes de variación, lo que sugiere que ni el AG₃ ni los NTC provocaron alteraciones en el desarrollo de las plántulas.

En cuanto a las semillas sin germinar (SSG %), no se observan efectos significativos en ninguno de los tratamientos. Este resultado indica que los tratamientos aplicados no afectaron la proporción de semillas que no lograron completar el proceso de germinación, lo cual es importante para la elección de tratamientos pregerminativos.

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables evaluadas en laboratorio.

F.V.	G.L.	VIGOR %	GER %	PAV %	PBV %	PA %	SSG %
AG₃	2	0.266 NS	26.666 NS	145.866 NS	65.866 NS	24.800 NS	1.866 NS
NTC	4	26.266 NS	15.066 NS	851.066 **	930.933 **	8.266 NS	21.733 NS
AG₃ X NTC	8	10.266 NS	15.666 NS	669.866 **	599.533 **	6.466 NS	8.533 NS
Error	45	17.511	15.644	75.377	68.266	10.400	6.044
C.V. %		4.392	4.143	12.309	33.137	124.034	131.707

** = Significativo al 0.01% de probabilidad; * = Significativo al 0.05 de probabilidad; AG₃ = Ácido Giberélico; NTC = Nanotubos de Carbono; FV = Fuente de Variación; GL = Grados de Libertad; GER = Germinación, PAV = Plántulas con Alto Vigor; PBV = Plántulas con Bajo Vigor; PA = Plántulas Anormales; SSG = Semillas sin Germinar.

En el Cuadro 2 se presentan los cuadrados medios de los análisis de varianza para las fuentes de variación ácido giberélico (AG_3), los nanotubos de carbono (NTC) y su interacción ($AG_3 \times NTC$) sobre diversas variables relacionadas con el crecimiento y desarrollo de plántulas, incluyendo el peso seco de plántula (PSP), el largo de plúmula (LP), el largo de radícula (LR) y el índice LP/LR.

De acuerdo con los resultados obtenidos para el peso seco de plántula, el tratamiento con NTC y su interacción con AG_3 presentaron efectos estadísticamente significativos sobre esta variable, mientras que el AG_3 no mostró un efecto diferencial. La aplicación de NTC de forma individual, como en su interacción con AG_3 contribuye a una respuesta diferencial.

La variable longitud de la plúmula mostró efectos significativos en respuesta a los tratamientos individuales de AG_3 y NTC, así como en su interacción AG_3 y NTC. Este resultado indica que tanto el AG_3 como los NTC y su interacción contribuyen a una respuesta contrastante.

Similar a la longitud de plúmula, la longitud de radícula presentó efectos significativos para los tratamientos de AG_3 , NTC y su interacción. Los efectos indican que los NTC junto con el AG_3 promovieron el crecimiento de la radícula, lo cual mejora la capacidad de adaptación de las plántulas en condiciones de campo al incrementar su sistema radicular.

El índice de LP/LR refleja la relación entre el crecimiento de la plúmula y de la radícula. Este también mostró efectos significativos para AG₃, NTC y su interacción. El resultado indicó que se generó un crecimiento proporcional entre ambas estructuras.

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables evaluadas en laboratorio.

F.V.	G.L.	PSP	G.L.	LP (cm)	LR (cm)	ÍNDICE LP/LR
AG₃	2	0.105 NS	2	90.558 **	110.589 **	0.995 **
NTC	4	0.187 **	4	11.387 **	11.036 **	0.090 **
AG₃ X NTC	8	0.110 **	8	13.689 **	7.288 **	0.162 **
Error	45	0.352	1418	1.607	2.625	0.020
C.V. %		5.092		24.433	15.651	28.071

** = Significativo al 0.01% de probabilidad; * = Significativo al 0.05 de probabilidad; AG₃ = Ácido Giberélico; NTC = Nanotubos de Carbono; FV = Fuente de Variación; GL = Grados de Libertad; PSP = Peso Seco de Plántula, LP = Largo de Plúmula; LR = Largo de Radícula.

En el Cuadro 3 se muestra la comparación de medias para las variables evaluadas en semillas de brócoli tratadas con diferentes concentraciones de ácido giberélico (0, 5 y 10 ppm) en condiciones de laboratorio. La interpretación de los resultados se realizó en función de los niveles de significancia establecidos mediante la prueba de Tukey.

Para la variable del porcentaje de vigor de germinación, los tratamientos con AG₃ a 0, 5 y 10 ppm presentaron valores promedio del 95%, sin diferencias significativas entre ellos, representado por la literal “a”; indicando que el ácido giberélico no generó un efecto en el vigor de las semillas para germinar.

Similar al vigor de germinación, en la variable porcentaje de germinación, los tratamientos con 0 y 5 ppm de AG₃ presentaron valores estadísticamente igual, manteniendo el 95% y de 97% para 10 ppm, por lo que en esta variable ninguna de las concentraciones de AG₃ influyeron sobre la tasa de germinación de las semillas.

En cuanto al porcentaje de plántulas con alto vigor, se observaron valores de 71% para 0 ppm, 68% para 5 ppm y 73% para 10 ppm, siendo todos estadísticamente iguales según la prueba de Tukey.

En las plántulas con bajo vigor los valores obtenidos fueron de 24% para 0 ppm, 27% para 5 ppm y 24% para 10 ppm. Aunque existen ligeras variaciones entre los porcentajes, estas diferencias tampoco son significativas, por lo tanto, tampoco se produce un efecto marcado en la proporción de plántulas con bajo vigor. El nivel de vigor en las plántulas de brócoli no depende directamente de la concentración del AG₃.

Para la variable semillas sin germinar (SSG %) y plántulas anormales (PA %), se observó un valor constante de 2% en todos los tratamientos.

En el largo de la plúmula, el tratamiento con 10 ppm de AG₃ mostró un valor superior al obtener 5.67 cm el cual fue estadísticamente diferente a los valores obtenidos con 0 ppm (4.86 cm) y 5 ppm (5.01 cm). Esto indica que una concentración de 10 ppm de AG₃ favorece el alargamiento de la plúmula, lo cual podría contribuir a un desarrollo más vigoroso de la parte aérea de la plántula.

El largo de la radícula presentó diferencias significativas, con el valor más alto en el tratamiento de 0 ppm, ya que arrojó un resultado de 10.78 cm, seguido por 10 ppm con 10.44 cm y el valor más bajo fue de 9.82 cm con 5 ppm; por lo que las concentraciones de AG₃ influyeron ligeramente en el desarrollo de la radícula, aunque de una manera menos notoria que en el largo de la plúmula.

El peso seco de las plántulas fue de 3.66 mg/p para el tratamiento con 0 ppm, 3.70 mg/p para 5 ppm y 3.69 mg/p para el tratamiento con 10 ppm de AG₃, concluyendo que no afecta en la acumulación de la biomasa en términos de peso seco en las plántulas de brócoli bajo las condiciones de evaluación.

En cuanto al índice LP/LR, el tratamiento de 10 ppm mostró un resultado de 0.54 siendo el valor más alto, seguido por 5 ppm con 0.52 y 0 ppm con 0.45. Estas diferencias son estadísticamente significativas y sugieren que una mayor concentración de AG₃ puede favorecer un crecimiento proporcional de la parte aérea con relación a la radícula, lo cual indica un desarrollo equilibrado y vigoroso.

Cuadro 3. Comparación de medias de variables evaluadas en laboratorio en brócoli tratado con AG₃.

AG₃ (ppm)	VIGOR %	GER %	PAV %	PBV %	SSG %	PA %	LP (cm)	LR (cm)	PS mg/p	ÍNDICE LP/LR
0	95 a	95 a	71 a	24 a	2 a	3 a	4.86 b	10.78 a	3.66 a	0.45 c
5	95 a	95 a	68 a	27 a	2 a	3 a	5.01 b	9.82 c	3.70 a	0.52 b
10	95 a	97 a	73 a	24 a	2 a	1 a	5.67 a	10.44 b	3.69 a	0.54 a
MEDIA	95	96	71	33	2	2	5.31	10.35	4	0.51
TUKEY	3	3	6.6	6.3	2	2	0.19	0.24	0.14	0.02

Valores con la misma literal dentro de una columna son estadísticamente iguales (Tukey = 0.05). AG₃ = Ácido Giberélico; GER = Germinación; PAV = Plántulas con Alto Vigor; PBV = Plántulas con Bajo Vigor; SSG = Semillas sin Germinar; PA = Plántulas Anormales; LP = Largo de Plúmula; LR = Largo de Radícula; PS = Peso Seco, p = Plántula

En el Cuadro 4 se presenta la comparación de medias de los diferentes tratamientos con nanotubos de carbono (NTC) en variables relacionadas con la germinación y el crecimiento de plántulas de brócoli, evaluadas en condiciones de laboratorio. Se usó la prueba de Tukey y a continuación se detallan los resultados obtenidos para cada variable.

Las distintas concentraciones de NTC (0, 25, 50, 100 y 200 ppm) no mostraron diferencias estadísticas en cuanto al vigor de germinación, con valores constantes alrededor del 95%. Esto indica que el uso de NTC en estos niveles no generó un impacto significativo en el vigor general para germinar de las semillas de brócoli.

El porcentaje de germinación, al igual que para el vigor de germinación, se mantuvo estadísticamente constante, con valores de 95% en la mayoría de los tratamientos y 97% para 0 y 200 ppm; por lo tanto, la aplicación de NTC tampoco influyó en la capacidad de germinación de las semillas.

Sin embargo, en la variable plántulas con alto vigor se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento con 25 ppm de NTC resultó en un porcentaje de plántulas con alto vigor (83%), estadísticamente superior al resto de las demás concentraciones, mientras que las concentraciones de 50 y 200 ppm presentaron valores intermedios (72%), y la concentración de 0 ppm mostró el nivel más bajo (61%). Estos resultados indican que una de 25 ppm de NTC es óptima para mejorar el vigor de las plántulas en términos de calidad.

En los datos obtenidos en las plántulas con bajo vigor se observaron diferencias como en las plántulas con alto vigor. El valor de plántulas con bajo vigor fue de 12% con un tratamiento de 25 ppm. Las concentraciones de 50 y 200 ppm presentaron valores superiores: 23% y 25% respectivamente, y el tratamiento de 0 ppm mostró el valor más alto (36%). Estos datos sugieren que una concentración de 25 ppm de NTC reduce significativamente el porcentaje de plántulas con bajo vigor, haciendo coherencia con los resultados obtenidos en las plántulas con alto vigor.

En cuanto a las semillas sin germinar, el tratamiento con 200 ppm de NTC mostró el valor más bajo (0%), aunque sin diferencias estadísticas marcadas con los otros tratamientos, que se mantuvieron entre 1 y 3%. Esto indica que, aunque los NTC pueden tener un ligero efecto sobre la reducción de semillas sin germinar en concentraciones altas, esta influencia no es estadísticamente significativa.

En las plántulas anormales no se observaron diferencias de importancia en el porcentaje entre los tratamientos con distintas concentraciones de NTC, manteniéndose en valores bajos entre el 2 y 4%. Esto sugiere que los niveles de NTC evaluados no impactan en la proporción de plántulas anormales, lo cual es positivo para la calidad general del cultivo.

En la longitud de la plúmula se observaron diferencias significativas entre tratamientos. La concentración de 25 ppm presentó el valor más alto con 5.44 cm, seguido de 5.34 cm con 200 ppm, mientras que la concentración de 100 ppm presentó el valor más bajo con 4.97 cm. Esto concluye que concentraciones altas a moderadas de NTC pueden favorecer el alargamiento de la plúmula, lo cual es favorable para el crecimiento de la parte aérea de las plántulas.

Para la variable longitud de la radícula, las concentraciones de 25 y 50 ppm presentaron los valores más altos, con 10.55 cm y 10.47 cm, mientras que el tratamiento de 0 ppm mostró el valor más bajo con 10.04 cm. Este resultado indica que las concentraciones bajas a moderadas de NTC favorecen el desarrollo de la radícula.

En cuanto a el peso seco de la plántula, el tratamiento de 25 ppm obtuvo el valor más alto de 3.85 mg/p, mientras que el resto de los tratamientos presentaron el valor más bajo entre 3.55 mg/p a 3.77 mg/p. Esto sugiere que una concentración de 25 ppm de NTC promueve una mayor acumulación de biomasa en las plántulas.

Finalmente, el índice LP/LR se mantuvo entre 0.49 y 0.52, sin diferencia importante entre los tratamientos. Este índice refleja un crecimiento balanceado entre la plúmula y la radícula en todos los niveles de NTC, concluyendo en que existe una relación balanceada entre el crecimiento de partes aéreas y subterráneas de las plántulas.

Cuadro 4. Comparación de medias de variables evaluadas en laboratorio en brócoli tratado con NTC.

NTC (ppm)	VIGOR %	GER %	PAV %	PBV %	SSG %	PA %	LP (cm)	LR (cm)	PS mg/p	ÍNDICE LP/LR
0	96 a	97 a	61 c	36 a	1 ab	2 a	5.06 bc	10.04 b	3.77 ab	0.51 abc
25	95 a	95 a	83 a	12c	3 a	2 a	5.44 a	10.55 a	3.85 a	0.52 ab
50	93 a	95 a	72 b	23 b	3 a	2 a	5.11 bc	10.47 a	3.55 c	0.49 bc
100	94 a	94 a	65 bc	29 ab	2 ab	4 a	4.97 c	10.29 ab	3.60 bc	0.49 c
200	97 a	97 a	72 b	25 b	0 b	3 a	5.34 ab	10.40 ab	3.64 abc	0.52 a
MEDIA	95	95	70	25	2	3	5.18	10.35	3.68	0.50
TUKEY	5	5	10.71	9.58	3	4	0.28	0.36	0.21	0.03

Valores con la misma literal dentro de una columna son estadísticamente iguales (Tukey = 0.05).

NTC = Nanotubos de Carbono; GER = Germinación; PAV = Plántulas con Alto Vigor; PBV = Plántulas con Bajo Vigor; SSG = Semillas sin Germinar; PA = Plántulas Anormales; LP = Largo de Plúmula; LR = Largo de Radícula; PS = Peso Seco.

CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó los efectos del ácido giberélico (AG₃) y los nanotubos de carbono (NTC), así como su interacción sobre la germinación y el desarrollo de plántulas de brócoli (*Brassica oleracea*) en condiciones controladas.

En general, la aplicación del AG₃ mostró efectos positivos en el crecimiento de la plúmula, promoviendo seguramente cambios en los procesos de división y elongación celular. Mientras que los NTC tuvieron efecto en el crecimiento de plúmula, radícula, peso de biomasa y en la índice plúmula/radícula.

Los resultados mostraron que la aplicación de NTC en dosis moderadas, específicamente a 25 ppm, favorece el desarrollo de plántulas con alto vigor y reduce la proporción de plántulas con bajo vigor, por lo que se obtiene una mayor calidad de establecimiento inicial de los cultivos. Sin embargo, las concentraciones más altas de NTC no mostraron un aumento significativo en el vigor en comparación con las dosis moderadas; por lo tanto, una concentración moderada maximiza los beneficios sin generar efectos adversos.

Los efectos observados indican que el AG₃, a pesar de su gran capacidad para estimular el crecimiento, no mostró diferencias significativas en la germinación ni en el vigor cuando se aplicó individualmente, aunque a 10 ppm favoreció el significativamente el alargamiento de la plúmula y un crecimiento balanceado entre la plúmula y la radícula. Esto genera un énfasis en la importancia de investigar más sobre la interacción entre el AG₃ y los NTC como tratamiento en conjunto para maximizar los beneficios en cuanto al vigor y al desarrollo de las plántulas.

La aplicación de NTC, especialmente en concentraciones de 25 y 50 ppm, favoreció el crecimiento de la plúmula y de la radícula, con un efecto positivo en la parte aérea y en la radícula de las plántulas; destacando un gran potencial como herramienta de producción agrícola de brócoli. Esto puede contribuir a mejorar la eficiencia de establecimiento de cultivos en campo, sugiriendo que el uso de los NTC en combinación con el AG₃ es una estrategia para optimizar la calidad y el vigor de las plántulas en condiciones agrícolas.

La combinación de NTC y AG₃ representa una estrategia viable y potencialmente beneficiosa para la producción de hortalizas en ambientes controlados. Sin embargo, es recomendable continuar realizando estudios adicionales para evaluar los efectos de estas aplicaciones en condiciones de campo y a gran escala, considerando factores ambientales y prácticas agrícolas diversas, con el fin de garantizar la sostenibilidad y efectividad del uso de estas tecnologías en el sector agrícola.

LITERATURA CITADA

Abou-Quad, H. (2007). Effect of scarification, gibberellic acid and scarification on seed germination of three Pistacia species. A-Njah Univ. J. Res. (N. Sc.) 21: 1-11.

Ahmad, P., Raja, V., Ashraf, M., Wijaya, L., Bajguz, A., & Alyemeni, M. N. (2021). Gibberellic Acid: A Versatile Regulator of Plant Growth, Development and Stress Responses. Journal of Plant Growth Regulation.

Amri, B., Khamassi, K., Ali, M. B., & da Silva, J. A. T. (2016). Effects of gibberellic acid on the process of organic reserve mobilization in barley grains germinated in the presence of cadmium and molybdenum. South African Journal of Botany, 106, 35–40.

Arteca, R. N. (1996). Plant Growth Substances: Principles and Applications. Springer.

Azcón-Bieto, J. & Talón, M. 2000. Fisiología y bioquímica vegetal. ED., McGraw Hill/Interamericana, Barcelona, España. 123 p.

Aziz, T., & Pekşen, E. (2020). Seed priming with gibberellic acid rescues chickpea (*Cicer arietinum* L.) from chilling stress. Acta Physiol. Plant, 42, 1–10.

Cavusoglu, A., and M. Sulusoglu. 2015. The effects of exogenous gibberellin on seed germination of the fruit species. Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi 8(1): 06-09.

<https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/417953>

Choudhary, P., Singh, N., & Mehta, C. M. (2019). Role of carbon nanomaterials in agriculture and water treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(2), 631-644.

Cornea-Cipcigan, M., Pamfil, D., Sisea, C. R., & Mărgăoan, R. (2020). Gibberellic Acid Can Improve Seed Germination and Ornamental Quality of Selected Cyclamen Species Grown Under Short and Long Days. *Agronomy*, 10(4), 516.

Caoduro, C., Kacem, R., Boukari, K., Picaud, F., Brachais, C. H., Monchaud, D., Pudlo, M. (2016). Carbon nanotube - Protamine hybrid: Evaluation of DNA cell penetration. *Carbon*, 96, 742–752. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.09.098>

Davies, P. J. (2010). *Plant Hormones: Biosynthesis, Signal Transduction, Action!* (3rd ed.). Springer.

Deaquiz-Oyola, Y. A., & Burgos-Ávila, Y. E. (2013). Efecto de la aplicación de giberelinas (GA₃) sobre germinación de semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad Santa Cruz. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7(1), 73-84.

Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., & Avouris, P. (2000). *Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties, and Applications*. Springer Science & Business Media.

Fraile-Robayo, A. L., Álvarez-Herrera, J. G. & Deaquiz-Oyola, Y. A. (2012). Efecto de las giberelinas en la propagación de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo diferentes sustratos enriquecidos con fertilizante. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 6 (1): 41-54

Gil, A. & Miranda, D. 2008. Efecto de la temperatura, inmersión en agua y concentración de fitorreguladores sobre la germinación de semillas de papaya (*Carica papaya* L.). Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas 2 (1): 9-20.

González, M., Caycedo, C., Velásquez, M., Flórez, V. & Garzón, M. 2007. Efecto de la aplicación del ácido giberélico sobre el crecimiento del coliflor (*Brassica oleraceae* L.) var. Botrytis DC. Agronomía Colombiana, 25(1): 54-61

He, H., Pham-Huy, L. A., Dramou, P., Xiao, D., Zuo, P., & Pham-Huy, C. (2013). Carbon nanotubes: Applications in pharmacy and medicine. BioMed Research International, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/578290>

He, X., Li, M., Li, C., Ren, X., & Ding, Y. (2023). Physiology and Application of Gibberellins in Postharvest Horticultural Crops. Horticulturae, 9(6), 625. Hopkins, W. G., & Hüner, N. P. A. (2009). Introduction to Plant Physiology (4th ed.). Wiley.

Juárez C., G. 2020. Evaluación de los efectos de los nanotubos de carbono naturales y sintéticos en la promoción del crecimiento vegetal. Tesis de Doctorado. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/5603

Khodakovskaya, M., Kim, B. S., Kim, J. N., Alimohammadi, M., Dervishi, E., Mustafa, T., & Biris, A. S. (2013). Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. Small, 9(1), 115-123.

Khodakovskaya, M. V., de Silva, K., Nedosekin, D. A., Dervishi, E., Biris, A. S., Shashkov, E. V., & Zharov, V.P. (2011). Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells. ACS nano, 5(1), 321-328.

Kumar, A., Gupta, K., Dixit, S., Mishra, K., & Srivastava, S. (2018). A review on positive and negative impacts of nanotechnology in agriculture. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(4), 2175-2184.

Kucera, B., MA. Cohn, and G. Leubner-Metzger. 2005. Plant hormone interactions during seed dormancy release and germination. *Seed Science Research* 15(4): 281-307. <https://doi.org/10.1079/SSR2005218>

Larcher, W. (2006) *Ecofisiologia Vegetal*. 3ª Edición. RiMa, San Carlos.

Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354(6348), 56-58.

Lin, D., & Xing, B. (2007). Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environmental Pollution*, 150(2), 243-250.

Loayza, A.P., P. García-Guzmán, G. Carozzi-Figueroa, and D.E. Carvajal. 2023. Dormancy-break and germination requirements for seeds of the threatened Austral papaya (*Carica chilensis*). *Scientific Reports* 13(1): 17358. <https://www.nature.com/articles/s41598-023-44386-y>

Pandey, K., Lahiani, M.H., Hicks, V.K., Hudson, M.K., Green, M.J., Khodakovskaya, M. (2018). Effects of carbon-based nanomaterials on seed germination, biomass accumulation and salt stress response of bioenergy crops. *PLoS ONE* 13(8): e0202274. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202274>

Rademacher, W. 2000. Growth retardants: effects on gibberellin biosynthesis and other metabolic pathways. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 51: 501–531

Rojas-Aréchiga, M., Casas, A. & Vázquez-Yanes, C. 2007. Seed germination of wild and cultivate *Stenocereus stellatus* (Cactaceae) from the Tehuacán, Cuicatlán Valley, Central Mexico. *J. Arid Env.* 49: 279-28. Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (1992). *Plant Physiology* (4th ed.). Wadsworth Publishing Company.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2023). Producción agrícola. Recuperado el 29 de septiembre de 2024 en: <https://www.gob.mx/siap>.

Taiz, L. & Zeiger, E. (2006). *Plant physiology*. 4th ED., Sinauer Associates Publishers, Sunderland, MA.

Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology* (5th ed.). Sinauer Associates. Sunderland, MA.

Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, S., Singh, Y., Pandey, R., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2017). An overview of manufactured nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 2-12.

Wang, P., Lombi, E., Zhao, F. J., & Kopittke, P. M. (2016). Nanotechnology: A new opportunity in plant sciences. *Trends in Plant Science*, 21(8), 699-712.

Zhang, M., Gao, B., Chen, J., & Li., Y. 2015. Effects of graphene on seed germination and seedling growth. *J. Nanopart. Res.* 17:78. DOI10.1007/s11051-015-2885-9