

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Nanopartículas de Quitosán y Yodo en la Fisiología
y Productividad de la Fresa (*Fragaria x ananassa*)

Por:

FABIÁN GONZÁLEZ LINARES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México.

Junio, 2025.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Nanopartículas de Quitosán y Yodo en la Fisiología
y Productividad de la Fresa (*Fragaria × ananassa*)

Por:

FABIÁN GONZÁLEZ LINARES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



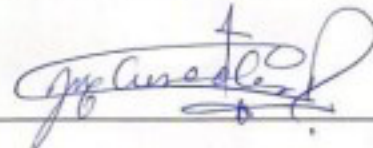
Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente

Asesor Principal



Dra. Rocio Maricela Peralta Manjarrez

Asesor Principal Externo



Dra. Fabiola Aureoles Rodríguez

Dr. Adalberto Benavides Mendoza

Coasesor

Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Ramírez
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México.

Junio, 2025.

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.

Fabián González Linares.

Fabián González Linares

Autor Principal



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente

Asesor Principal

DEDICATORIA

A **Dios** por haber permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor; gracias a el que me fortalece y me llena de oportunidades y misericordia cada día.

A mis padres: **Fidel González Ramírez y Eva Linares Méndez**, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy; por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me han inculcado.

A mis hermanos: **Jesús González y Aarón González**. Muchas gracias por no dejarme rendir y por ser mí motivo de salir adelante, sé que sin ustedes no lo hubiera logrado. Con esfuerzo y dedicación todo es posible.

A mis abuelos: **Alfredo Linares y María del Rosario Méndez (†)** gracias por llenarme de amor y cariño desde que era un niño, crecer con sus consejos y enseñanzas me han permitido llegar hasta aquí. No pude tener mejores maestros que me inculcaran las bases de esta bonita profesión, el amor al campo y al trabajo se los debo a ustedes. Que aunque ya no están conmigo, sé que están muy orgullosos de mí.

AGRADECIMIENTOS

A mi **Alma Mater, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**: Por abrirme las puertas y cobijarme todo este tiempo, siempre llevare con orgullo sus valores y conocimientos. Grandes recuerdos vividos en esta institución que siempre recordare con anhelo.

Al **Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente** por ser una gran persona y ser el pilar de esta investigación. Gracias por todo el apoyo a lo largo de la carrera y por compartir sus conocimientos con nosotros que fueron de gran importancia para mejorar mis habilidades.

A la **Dra. Roció Maricela Peralta Manjarrez**: gracias por el apoyo y seguimiento que me brindo cuando lo requerí a lo largo de este proyecto.

A mis tíos y abuelito: que durante todo este tiempo me han demostrado orgullo y felicidad.

A mis primos Luis Alberto y Eliseo gracias por guiarme con su ejemplo de trabajo y dedicación desde que era un niño, siempre serán mis hermanos.

A Fátima Torres: Muchas gracias por estar durante el proceso, por tu paciencia apoyo y cariño que me has brindado siempre, además por todos los buenos momentos en los que convivimos. Gracias por estar a mi lado y celebrar cada logro conmigo, este es uno de tantos que nos esperan.

A **Juan Pablo Velasco** mi amigo y colega desde el día uno que pertenezco a esta universidad, quien fue un gran apoyo a lo largo de la carrera y en el desarrollo de esta tesis. El mejor de los éxitos siempre.

A mis amigos **José Armando, Mariana, Mario, Isaid, Angélica, Yoseline, David, José Alfredo** que durante estos cuatro años estuvieron compartiendo su compañía, conocimiento y alegría, gracias por todas las experiencias vividas.

ÍNDICE

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
ÍNDICE DE TABLAS	V
RESUMEN	VI
I. INTRODUCCION	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Hipótesis	2
1.4. Justificación	2
II. LITERATURA REVISADA	3
2.1. Antecedentes del cultivo	3
2.2. Origen e historia del cultivo	3
2.3. Superficie establecida y volumen de producción de fresa.....	3
2.4. Efecto del yodo en las plantas	4
2.5. El quitosán como bioestimulante en la nutrición vegetal.....	4
2.6. Nanotecnología en la agricultura.....	5
2.7. Tamaño de las nanopartículas empleadas en los cultivos.....	5
2.8. Proceso de absorción de nanopartículas vía foliar.....	6
2.9. Efecto de las nanopartículas de yodo	6
2.10. Efecto de nanopartículas de quitosán	6
2.11. Requerimientos climáticos	7
2.12. Radiación.....	7
2.13. Fenología del cultivo	7
2.14. Rendimiento Biológico	8
2.15. Rendimiento Económico	8
2.16. Parámetros de calidad comercial	8
2.17. Parámetros de calidad nutracéutica.....	9
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
3.1. Ubicación del experimento.....	9
3.2. Material utilizado	9
3.2.1. Material vegetal.....	9

3.2.2. Sales yodadas y los complejos de quitosán yodados (CS-KI y CS-KIO3)	10
3.3. Manejo del cultivo	10
3.3.1. Preparación del sustrato.....	10
3.3.2. Trasplante.....	10
3.3.3. Manejo Nutricional.....	10
3.3.4. Riego.....	11
3.3.5. Manejo fitosanitario.....	12
3.4. Tratamientos Empleados.....	12
3.5. Variables de Respuesta	13
3.5.1. Parámetros Fisiológicos y Agronómicos	13
3.5.2. Parámetros productivos.....	13
3.6. Frecuencia de los Muestreos	13
3.7. Diseño Estadístico	14
3.8. Análisis de la Información	14
IV. RESULTADOS Y DISCUSION.....	14
4.1. Parámetros fisiológicos y agronómicos.	14
4.2. Parámetros productivos.	17
V. CONCLUSIONES.....	19
VI. REVISION DE LITERATURA.....	20
VII. ANEXOS	28
7.1. Análisis de la varianza en el crecimiento vegetativo y conductancia estomática.	28
7.2. Análisis de varianza de parámetros productivos.	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Macroelementos para la Solución Steiner de acuerdo a la fenología de la planta en 200 litros.	11
Tabla 2. Microelementos para la Solución Steiner de acuerdo a la fenología de la planta en 200 litros.	11
Tabla 3. Tratamientos evaluados.	12
Tabla 4. Efecto de aplicaciones foliares de nanopartículas (Nps) de quitosán y yodo sobre parámetros fisiológicos y agronómicos del cultivo de fresa.	15
Tabla 5. Efecto de aplicaciones foliares de nanopartículas (Nps) de quitosán y yodo en la productividad del cultivo de fresa.	17

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la respuesta fisiológica, agronómica y productiva de plantas de fresa (cv. Monterrey) a las distintas aplicaciones de nanopartículas de quitosán (), yodato de potasio (), yoduro de potasio (), nanopartículas de yodato de potasio () y nanopartículas de yoduro de potasio (). Las variables evaluadas incluyeron número de hojas, diámetro de corona, peso fresco, peso seco y conductancia estomática, así como diámetro ecuatorial, diámetro polar, peso de frutos, número de frutos por planta y rendimiento. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con un total de seis tratamientos y con ocho repeticiones cada uno obteniendo un total de 48 plantas. De los resultados obtenidos se encontró que al utilizar nanopartículas de yoduro de potasio hay un incremento del 34% en el número de hojas y un 114% el diámetro de corona, así mismo, para las variables de diámetro ecuatorial, diámetro polar y para rendimiento por planta incremento un 50%, 28% y 86% respectivamente. Sin embargo, para las variables de peso fresco, peso seco, conductividad estomática y número de frutos, no se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0.0001$). El uso de nanopartículas de yoduro de potasio representa una alternativa para ser utilizadas como bioestimulantes que mejoran el desarrollo y producción del cultivo de fresa.

Palabras claves: Quitosán, Yodato, Yoduro, Potasio, Nanopartículas, Rendimiento y Calidad.

I. INTRODUCCION

El cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa*) está ampliamente distribuido en el mundo debido a su alto valor económico y diversidad genotípica que se produce a campo abierto e invernadero, con sistemas de producción en macro y microtúneles, sustratos, acolchados y sistemas hidropónicos (Botero *et al.*, 2022).

La producción intensiva de esta especie agrícola ha generado una serie de problemas como la contaminación del agua, la salinización y degradación de los suelos, por fertilizaciones frecuentes que originan reducción del rendimiento y calidad de las fresas (Pérez, 2020).

Así mismo, los bioestimulantes ofrecen una solución alternativa para los sistemas productivos, ya que tienen el potencial de regular o modificar los procesos fisiológicos para incentivar el crecimiento, mitigar factores de estrés e incrementar rendimiento (Anchondo *et al.*, 2024).

De acuerdo a lo anterior, el uso de quitosán (Cs) que es un biopolímero derivado de la quitina, polisacárido muy abundante en la naturaleza principalmente en los exoesqueletos de animales como insectos y crustáceos (Valencia, 2015). Como bioestimulante este polímero induce la producción de fitoalexinas; protege plantas de enfermedades patógena, ya que inhibe el crecimiento microbiano y además participa en la síntesis de alcaloides y reguladores de crecimiento vegetal (Amaro, 2023).

El uso de yodo en la agricultura como bioestimulante mejora la síntesis de clorofila elevando la actividad fotosintética y actúa como iniciador hormonal dosificado a bajas concentraciones (Garcés, 2022). Además, resulta favorable para la biofortificación especialmente para las hortalizas de hoja (Leija *et al.*, 2016).

Por lo tanto, se han empleado diversas estrategias para incrementar la bioactividad de compuestos, como las nanopartículas de quitosán y yodo, tecnología que muestra mayor efectividad debido a la alta relación superficie-volumen, tamaño y de fácil absorción en la planta mejorando la productividad (Méndez *et al.*, 2016).

1.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de las nanopartículas de quitosán y yodo en la fisiología y productividad de la fresa.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar el efecto fisiológico de las nanopartículas de quitosán y yodo aplicados de manera foliar en las plantas de fresa.
- Determinar el efecto bioestimulante de las nanopartículas de quitosán y yodo aplicados de manera foliar sobre las variables de productividad en plantas de fresa.
- Identificar la fuente de Yodo que presente mejores rendimientos fisiológicos y productivos en la planta de fresa.

1.3. Hipótesis

Las nanopartículas de quitosán y la fuente de yodo influirán en el desarrollo fisiológico y productivo de las plantas de fresa.

1.4. Justificación

Debido a que el cultivo de la fresa se ve afectado en el crecimiento y desarrollo en los sistemas productivos, lo que demerita su fisiología y su productividad, se planea como estrategia la implementación de nanopartículas de quitosán yodo de manera foliar para favorecer cambios positivos sobre los indicadores antes mencionados y que incidan en una mejora en el rendimiento y la calidad final del cultivo.

II. LITERATURA REVISADA

2.1. Antecedentes del cultivo

En los últimos años la producción de fresa se ha estado incrementando, debido a que la agricultura protegida presenta ventajas competitivas en comparación con la agricultura en campo abierto (Sánchez, 2022). En México el cultivo de fresa es importante desde el punto de vista socioeconómico, debido a que genera empleo y divisas por ser producto de exportación para su consumo en fresco, congelado y procesado (Torres, 2024).

2.2. Origen e historia del cultivo

La fresa es una planta herbácea perteneciente a la familia de las rosáceas y al género *Fragaria*. Este cultivo es una especie hortícola que se ha cultivado y originado desde varios siglos en Europa y Estados Unidos de América, catalogándose como una de las principales frutas de consumo (Torres, 2023).

Existe una gran cantidad de especies de fresa a través del mundo. Las más extendidas que se cultivan derivan de un cruce espontáneo de dos especies, *Fragaria virginiana* y *Fragaria chiloensis*, importadas entre los siglos XVII y XVIII del nuevo continente (López, 2022).

2.3. Superficie establecida y volumen de producción de fresa

La fresa es un producto exitoso en el mercado internacional destinando el 52.21% al mercado externo, colocando a México como el tercer proveedor de fresa en el mercado internacional, con un valor del 14.38% de exportaciones mundiales (SAGARPA, 2017).

En 2023, el volumen de producción de fresas en México alcanzó las 641,000 toneladas, lo que representa un aumento del 10.8% en comparación con la producción reportada en 2022 que fue de 578,584 t en una superficie sembrada de 20,779 ha (SIACON, 2023).

Los principales estados productores de fresas frescas son Michoacán, Baja California, y Guanajuato los cuales aportan en conjunto alrededor del 96% de la producción nacional (SENASICA, 2024).

2.4. Efecto del yodo en las plantas

El yodo es un elemento no esencial para las plantas pero induce respuestas positivas en el crecimiento y metabolismo, sin embargo, el efecto este elemento en las plantas está determinado por múltiples factores que incluyen la concentración aplicada, el tipo de sal de I aplicada y la especie de planta (Melgoza *et al.*, 2016). Al utilizarlo como biofortificador se mejora la calidad nutricional, debido a que aumenta la concentración de yodo en los frutos, la actividad antioxidante y la concentración de minerales (Lara *et al.*, 2023).

Según (García, 2021) el yodo puede funcionar como un antioxidante, debido a la inducción a tolerancia a una mayor resistencia a ciertos tipos de estrés abiótico, tales como la salinidad y metales pesados, así como a la reducción del deterioro fisiológico de semillas a alta temperatura y humedad.

Mientras que Cortes *et al.*, 2016 demostró que la aplicación foliar de yodo, como KI, en plántulas de pimiento morrón mejora la absorción de minerales, la cantidad y actividad de antioxidantes y el vigor de la plántula.

2.5. El quitosán como bioestimulante en la nutrición vegetal

Existen grandes variaciones entre diferentes cultivos en sus respuestas a la aplicación de quitosán. Aplicado al suelo como nutriente vegetal ha mostrado un efecto importante en el crecimiento de las plantas debido a la inducción de mecanismos de defensa contra patógenos y la tolerancia a estrés abiótico (Rivas *et al.*, 2021). Esta mejora en la defensa se atribuye al aumento de la actividad antioxidante y producción inducida de enzimas en los cultivos (Pérez *et al.*, 2019).

De manera foliar la aplicación de quitosán mejora la eficiencia de absorción de nutrientes minerales como nitrógeno, potasio, fósforo, calcio y magnesio en las

plantas tratadas. Por lo tanto, muestra un efecto positivo sobre el crecimiento de raíces, brotes, hojas y frutos de varios cultivos (Jarrillo, 2020).

2.6. Nanotecnología en la agricultura

Las inversiones en agricultura y alimentación nanotecnológica van en aumento debido a sus beneficios potenciales, los cuales incluyen desde la mejora en la calidad e inocuidad de los insumos agrícolas hasta un mejor procesamiento y mayor valor nutricional de los mismos (Vázquez, 2023).

Durante los últimos años, la NT ha cobrado importancia en la agricultura debido a sus diferentes aplicaciones como plaguicidas, herbicidas, reguladores de crecimiento, bioestimulantes y fertilizantes (Javed *et al.*, 2023). La dosificación y liberación controlada de los agroquímicos nanoparticulados aumenta la efectividad de estos, generando alimentos resistentes al ataque de plagas por durante más tiempo en comparación con los cultivos obtenidos por los métodos tradicionales (Marín *et al.*, 2021).

Además, otro tipo de nano sensores permiten precisar, detectar y entregar la cantidad correcta de nutrientes y plaguicidas que promueven la productividad sustentable utilizando diversos tipos de NPs (Saldívar, 2018).

2.7. Tamaño de las nanopartículas empleadas en los cultivos

Las NPs se caracterizan por tener un tamaño muy pequeño, según el sistema internacional (S.I) de unidades de medida, “nano” se usa para indicar un factor de 10^{-9} (multiplicar algo por 0.000000001). De tal manera, las dimensiones de las NPs se encuentran entre 1 y 300 nm (Cervantes, 2020).

Las menores dimensiones de las NPs logran tener mayor facilidad de acceso a las plantas, lo cual representa mayores puntos de contacto con las células, dando como resultado mayor capacidad de bioestimulación (Garza, 2023).

2.8. Proceso de absorción de nanopartículas vía foliar

La penetración de los tejidos vegetales por las NPs ocurre a través de dos vías de absorción diferentes: una vía polar, a través de tricomas, hidátodos y estomas y una no polar a través de la cutícula de la hoja y sus poros (Peña *et al.*, 2019). Una vez que ingresan a las capas externas de las hojas, las NPs avanzan a través de la vía del apoplasto y simplasto, hasta alcanzar los vasos del floema, el cual representa el principal medio para el transporte hacia otros órganos de la planta (Vázquez, 2022).

2.9. Efecto de las nanopartículas de yodo

Se ha observado que la absorción de yodo, induce efectos benéficos relacionados con un incremento en el crecimiento, capacidad antioxidante y tolerancia a estrés oxidativo en las plantas terrestres (Medrano, 2017).

El uso de las nanopartículas de I permite prevenir y eliminar problemas fitosanitarios, debido a sus propiedades en el control de bacterias, hongos, virus y sus múltiples beneficios como estimulante a la floración, fructificación, amarre de frutos, aumenta la concentración de minerales y aumenta la actividad fotosintética (Espínola, 2023).

2.10. Efecto de nanopartículas de quitosán

Las nanopartículas de quitosán (NPs-Q) poseen propiedades químico-biológicas derivadas del quitosán como agente antimicrobiano, antiviral, regenerador de tejidos, así como bioestimulante (Vázquez, 2016). Además se caracteriza por no presentar toxicidad, ser biodegradable y presentar alta biocompatibilidad biológica (Pérez, 2021).

Así mismo, el quitosano puede ser usado como elicitador, al poseer propiedades promotoras para el crecimiento y su regulación, así como para germinación, la nutrición de cultivos e incremento en el rendimiento reportados los efectos benéficos para aumentar la tolerancia al estrés biótico y abiótico (Magdaleno *et al.*, 2017).

2.11. Requerimientos climáticos

La fresa es un cultivo que se desarrolla muy bien a una altura de 1300 - 3000 msnm, con valores óptimos de temperatura de 15 a 20 °C, para obtener una producción rentable. Pero en la fase de floración y maduración se requiere 25 a 26°C durante el día (Concha, 2021). También se exige de una humedad relativa de un rango entre 60 y 75 %, con un consumo hídrico de 400 y 600 mm/año. En cuanto al fotoperiodo, las variedades de día neutro pueden soportar hasta 14 horas luz/día (Delgado *et al.*, 2025).

2.12. Radiación

Tovar *et al.*, (2023) menciona que una intensidad lumínica de 270 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en etapa de plántula y 300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en etapa de producción resulta óptima para la generación de biomasa y permite un mayor rendimiento de frutos. La reducción en la intensidad lumínica afecta la inducción floral, cuajado, tamaño, calidad y color de los frutos, además reduce el contenido de materia seca, la acumulación de azúcares y ácido ascórbico (Guaqueta, 2019).

2.13. Fenología del cultivo

El ciclo de vida de la fresa está constituido por tres etapas de desarrollo que se dividen en: vegetativa, reproductiva y productiva (Mahecha, 2018).

La etapa vegetativa comienza con la brotación de las yemas principales, aparecen las primeras hojas emergentes (9 o más) y se desarrollan partes vegetativas cosechables (estolones) (Dario, 2020).

La etapa vegetativa es la continuación de la fase inicial, con un aumento de materia seca más lento. Aparecen los primeros primordios florales y flores abiertas hasta que se puede apreciar la formación del fruto. La etapa productiva se caracteriza por el crecimiento de la planta junto con el desarrollo y maduración de frutos, para dar lugar a la fase de senescencia en hojas viejas (Niño, 2020).

2.14. Rendimiento Biológico

La evolución cronológica de medidas tales como peso seco, longitud de tallos, número de hojas, número de ramas, índice de floración, número de frutos y rendimiento por m², tienen que ver con el desarrollo absoluto de la planta, mientras que las tasas de crecimiento explican su eficiencia en acumular materia seca en los diferentes órganos, como producto de sus procesos metabólicos (Cadena, 2017).

2.15. Rendimiento Económico

En el año 2021, la derrama económica del cultivo de fresa superó los \$11,000 millones de pesos en 11,900 hectáreas cultivadas (Javalera, 2024). De la superficie dedicada al cultivo de fresa, el 90% es en sistemas que emplean sustratos orgánicos e inorgánicos, los cuales permiten alcanzar una producción de 40-50 To/Ha año (Arguello, 2019).

2.16. Parámetros de calidad comercial

La evaluación de la calidad de las fresas está enfocada principalmente en las características visuales, tales como el tamaño y el color, mientras que la selección se basa en el grado de maduración, tamaño (o calibre), uniformidad y sanidad de las frutas, factores que determinan la calidad física, sensorial y nutricional (Alvarado *et al.*, 2020).

Pérez (2020) menciona que la fruta se separa por tamaños de acuerdo al pedido de los compradores; la extra grande es una fruta de un diámetro mayor de 40 mm, la grande de 35 a 40mm, mediana de 30 a 35 mm y la pequeña de 25 a 30 mm de diámetro.

Así mismo, un fruto de calidad debe ser uniforme en cuanto a coloración y tamaño, debe estar exento de daño por sol y por frío, no debe haber pudrición y moho causado por microorganismos, cumpliendo con la forma, sabor y olor característico de la variedad (González, 2015).

2.17. Parámetros de calidad nutracéutica

Los frutos de fresa son una fuente importante de compuestos bioactivos que tienen efectos benéficos para la salud humana. La capacidad antioxidante de la fresa y sus derivados depende principalmente del alto contenido de vitamina C, así como de los contenidos de polifenoles, flavonoides y antocianinas (Sánchez, 2015).

El ácido ascórbico (vitamina C) es un potente antioxidante que se encuentra en la fresa en concentraciones de 5 a 50 mg/100g de peso fresco, se caracteriza por la neutralización de radicales libres y otras especies reactivas de oxígeno ayudando a disminuir el riesgo de incidentes cardiovasculares. De la misma manera la fresa es una fuente valiosa de compuestos fenólicos (flavonoides), los cuales reaccionan en numerosas enzimas de nuestro organismo con un efecto anticancerígeno (Franco, 2017).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del experimento

El presente trabajo se realizó en el ciclo primavera-verano del 2024 en un invernadero del departamento de horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, localizada entre las coordenadas 25°22'44" latitud Norte, 101°02" longitud oeste y una altitud de 1743 msnm.

3.2. Material utilizado

3.2.1. Material vegetal

Se utilizaron plántulas de fresa de la variedad Monterrey provenientes del estado de Michoacán. Con un fotoperiodo neutro, presenta una producción estable y una floración abundante y en forma de racimos. Además, se caracteriza por ser una planta vigorosa, con excelente sabor de frutos y posee una buena tolerancia a enfermedades.

3.2.2. Sales yodadas y los complejos de quitosán yodados (CS-KI y CS-KIO₃)

El complejo de quitosán-yoduro (CS-KI) y el complejo de quitosán-yodato CS-KIO₃ se prepararon en el Centro de Investigación de Química Aplicada (CIQA). Se utilizó quitosán (Cs) de un peso molecular viscosimétrico de 200 000 g mol⁻¹ de la marca Marine Chemicals (Marine, Hydrocolloids, Kerala, India), por la metodología descrita por Manikandan y Sathiyabama (2016). Para la formación de complejos se siguió el procedimiento descrito anteriormente incorporando a la suspensión coloidal soluciones de KI y KIO₃. Los tratamientos, solo con sales yodadas se prepararon en agua desionizada con 5 y 25 mg L⁻¹ de KI y KIO₃. El tamaño de las NPsCs fue de 100-500 nm, de los complejos NPsCs-I con KI de 50-250 nm y con KIO₃ de 50-450 nm, presentando todas las nanopartículas una forma esférica.

3.3. Manejo del cultivo

3.3.1. Preparación del sustrato

La mezcla del sustrato que utilizamos fue 2:1 peat most y perlita, mezclándose perfectamente y al mismo tiempo humedeciéndolo a capacidad de campo. Cabe señalar que el sustrato se esterilizó con agua caliente para la eliminación de patógenos. Posteriormente se rellenaron las macetas y se colocó la planta.

3.3.2. Trasplante

El trasplante se realizó el 02 de marzo del año 2024, se seleccionaron plantas con buena presencia de raíz y posteriormente se trasplantaron en macetas de 22 cm de altura por 10 cm de diámetro, obteniendo un total de 48 plantas y las cuales se distribuyeron dentro del invernadero al azar. Se procedió a dar el primer riego con solución nutritiva Steiner a una concentración del 15%.

3.3.3. Manejo Nutricional

Para la solución nutritiva hidropónica debe tener un pH de 5.5 a 6.5, con una conductividad eléctrica (CE) de 1.5 a 2 dS m⁻¹.

Tabla 1. Macroelementos para la Solución Steiner de acuerdo a la fenología de la planta en 200 litros.

	100%	50%	25%	15%
Ca(NO₃)₂	214	107.0	53.5	32.1
KNO₃	61	30.5	15.3	9.15
NaH₂PO₄ - H₂O	27.4	13.7	6.9	4.11
MgSO₄ – 7H₂O	98.4	49.2	24.6	14.76
K₂SO₄	70.4	35.2	17.6	10.56

Tabla 2. Microelementos para la Solución Steiner de acuerdo a la fenología de la planta en 200 litros.

	100%	50%	25%	15%
H₃BO₃	564	282	141	84.6
MnSO₄ – H₂O	430	215	107.5	64.5
ZnSO₄ – 7H₂O	79	39.5	19.8	11.85
CuSO₄ – 5H₂O	15.7	7.9	3.9	2.355
H₂M₀O₄ (85%)	160	80	40	24
Fe (quelatado)	10,000	5,000	2,500	1,500

La solución nutritiva se fue cambiando de acuerdo a la fenología de la planta, aplicando concentraciones de la solución acorde a su etapa fenológica (25, 50, 75 y 100%).

3.3.4. Riego

Los riegos se realizaron de forma manual. Durante las primeras dos semanas se rego cada planta con 500 ml de solución nutritiva al 15%. Las siguientes semanas incremento el volumen cada tercer día o dependiendo de las condiciones climáticas que se presentaran.

3.3.5. Manejo fitosanitario

Se realizaron aplicaciones preventivas del fungicida Captan a 0.5 g L^{-1} de forma foliar para prevenir enfermedades.

A las dos semanas después del trasplante se presentó mosca blanca por cual aplicamos un repelente orgánico a base de ajo (Bralic) de forma foliar cada tercer día.

Después de un mes se presentó araña roja, la cual se controló aplicando el acaricida Abamectina a 1 ml L^{-1} de forma foliar por tres semanas. Este manejo se alternaba con el lavado de las plantas con jabón Roma dos veces por semana aplicando 2 g L^{-1} como preventivo.

Durante el siglo se realizaron dos podas de saneamiento, para eliminar hojas secas y hojas dañadas por la araña roja.

3.4. Tratamientos Empleados

Se evaluaron 5 tratamientos más un testigo con 8 repeticiones cada uno, aplicándose cada 15 días de forma foliar.

Tabla 3. Tratamientos evaluados.

Tratamientos	
T1	Agua
T2	Nanopartículas de Quitosán
T3	Yodato de Potasio
T4	Yoduro de Potasio
T5	Nanopartículas de Yodato de Potasio
T6	Nanopartículas de Yoduro de Potasio

Nota: Las concentraciones de las NPS utilizadas, además de las fuentes de Yodo fueron a razón de 250 ppm.

3.5. Variables de Respuesta

3.5.1. Parámetros Fisiológicos y Agronómicos

- Conductancia estomática: se determinó a los 60 ddt en etapa de floración y formación de frutos, en condiciones de temperatura de 26°C y una humedad relativa del 80% dentro del invernadero. Se midió con la ayuda de un porómetro, las unidades se tomaron como referencia en mmol/m²S.
- Numero de hojas: se contaron de manera manual las hojas de cada una de las plantas.
- Diámetro de corona: se midió con la ayuda de un vernier digital, las unidades que se tomaron como referencia fueron en milímetros (mm).
- Peso fresco y peso seco: al final del ciclo del cultivo se quitaron las plantas de la maceta y se lavaron para pesarlas con la ayuda de una báscula digital. Después de un periodo de secado se pesaron nuevamente para determinar su peso seco.

3.5.2. Parámetros productivos

- Numero de frutos: se registró en el transcurso de la etapa de cosecha.
- Peso del fruto: se hizo con la ayuda de una báscula digital, las unidades se tomaron como referencia en gramos (gr).
- Diámetro ecuatorial del fruto: se tomó con la ayuda de un vernier, las unidades se tomaron como referencia en milímetros (mm).
- Diámetro polar del fruto: se tomó con la ayuda de un vernier, las unidades se tomaron como referencia en milímetros (mm).

3.6. Frecuencia de los Muestreos

Los muestreos de planta iniciaron el día 6 de Abril con intervalos de 15 días, para la determinación de los índices de crecimiento. Mientras que para los índices de

calidad y rendimiento de fruto, la toma de datos se hacía en el momento que el fruto se cosechaba, siendo el 10 de abril el primer día. Los frutos fueron cosechados cuando alcanzaron un color rojo brillante.

3.7. Diseño Estadístico

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar, donde se utilizaron 6 tratamientos con 8 repeticiones cada uno distribuidos de forma aleatoria teniendo una unidad experimental y un total de 48 plantas. .

3.8. Análisis de la Información

Los datos obtenidos se analizaron mediante el análisis estadístico ANOVA y comparación de medias con la ayuda de la prueba LSD Fisher ($\alpha = 0.05$), para esto se empleó el paquete estadístico infoStat, versión 2020.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Parámetros fisiológicos y agronómicos.

Como se observa en la Tabla 4, la variable de número de hojas mostro diferencia altamente significativa al utilizar nanoparticulas de yoduro de potasio ($p \leq 0.0003$) incrementando un 34 % en relación al testigo, también se observó una disminución numérica del 8% en esta variable al usar nanopartículas de quitosán en comparación con el testigo. Esto se puede atribuir a la capacidad de los complejos de nanomateriales, ya que por la naturaleza de sus compuestos actúan como promotores de crecimiento y estimulan procesos naturales del desarrollo de la planta (Juárez, 2019). Mientras que, en otros estudios se ha encontrado que el yodo favorece el desarrollo y absorción de minerales lo que permite un aumento en el área foliar (Cortes, 2016).

Tabla 4. Efecto de aplicaciones foliares de nanopartículas (Nps) de quitosán y yodo sobre parámetros fisiológicos y agronómicos del cultivo de fresa.

Tratamiento	Numero de hojas	Diámetro de corona (mm)	Peso fresco (gr)	Peso seco (gr)	Conductancia estomática mmol/m2S
Testigo absoluto (H2O)	11.00 b	7.73 c	56.28 a	23.86 a	84.47 a
NPSQ5 Nps de quitosán	10.13 b	14.66 ab	35.88 bc	12.16 b	84.88 a
KIO3 Yodato de Potasio	10.43 b	15.68 ab	34.69 bc	13.64 b	86.50 a
KI Yoduro de Potasio	14.63 a	10.69 bc	23.73 c	10.09 b	68.07 a
KIO3 Nps Yodato de Potasio	11.50 b	11.91 abc	33.52 bc	8.82 b	68.70 a
KI NPS Nps de Yoduro de Potasio	14.75 a	16.51 a	40.27 b	13.12 b	80.40 a
C.V	19.65	34.37	33.36	36.58	21.82
<i>p</i>	0.0003	0.0088	0.0030	0.0001	0.5656

C.V= Coeficiente de variación. Medidas con la misma letra no son significativamente diferentes LSD ($p < 0.05$).

En los resultados obtenidos en la Tabla 4 para el caso del diámetro de corona, muestran diferencias altamente significativas ($p \leq 0.0088$) para esta variable. El tratamiento con nanopartículas de yoduro de potasio fue el que obtuvo un mayor efecto incrementando en un 114 % en plantas de fresa en comparación con el testigo. De forma similar al tratar plantas con yodato de potasio se puede observar que hubo un incremento del 103% al comparar las plantas con el tratamiento testigo. Lo que se puede traducir como un indicador del vigor de las plantas, debido a que un incremento en el diámetro de corona implica una mayor traslocación de agua y nutrientes, promoviendo el crecimiento de las plantas (Rivera, 2024). Algunos autores como Medrano et al, (2016) mencionan que la forma de aplicación, donde se consigue mejor efecto bioestimulante es el I en forma de yoduro, tal como se observó en esta variable.

Los resultados analizados en la Tabla 4 para la variable de peso fresco según la prueba de medias LSD Fisher ($\alpha = 0.05$) nos muestran que el testigo presentó los

valores medios más altos con 56.28 gr seguido del tratamiento a base de nanopartículas de yoduro de potasio, que fue uno de los valores más altos. El peso fresco en plantas tratadas con yoduro de potasio fue 58% menor que en el testigo. Esto podría relacionarse con lo que menciona Treviño *et al.*, (2024), donde lo atribuye a una gran acumulación del Yodo (I) en los tejidos foliares, lo que ocasiona una disminución en la producción de biomasa fresca debido a la reducción de la expansión de la hoja y en la actividad fotosintética.

Con los resultados obtenidos para la variable de peso seco que se muestra en la Tabla 4 se puede observar que el testigo obtuvo mayor peso seco con una media de 23.8 g, significativamente superior a todos los demás tratamientos, los cuales no presentaron diferencias significativas entre ellos, siendo las Nps de yodato de potasio las que menos materia seca acumularon. Incrocci *et al.* (2019) señala que algunas concentraciones de KIO_3 pueden ser tóxicas e impactar negativamente en el área foliar, la materia seca total de la planta y la altura de la planta.

De acuerdo al análisis de varianza y comparación de medias para la variable de conductancia estomática, los tratamientos aplicados no presentaron diferencias estadísticas significativas al comparar con plantas testigo (Tabla 4). Numéricamente podemos observar un ligero incremento del 3% al tratar las plantas con yodato de potasio. Por otro lado, se observa una disminución numérica del 19% en la conductancia estomática del tratamiento con yoduro de potasio en comparación al testigo. Esto se atribuye a que el comportamiento de las plantas en los tiempos de muestreo, estuvo relacionado a la necesidad hídrica del cultivo, ya que en la toma de datos las plantas estaban en una etapa de floración y formación de frutos y este recurso se utiliza para el cuajado y llenado de frutos, de esta manera para mantener la turgencia y como mecanismo de defensa las plantas cerraban sus estomas para mantener el metabolismo celular (Amaro, 2023).

4.2. Parámetros productivos.

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos para las variables de diámetro ecuatorial y diámetro polar de los frutos. Al tratar plantas con nanopartículas de yoduro de potasio se encontraron diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0.0001$) del 50% comparada con el tratamiento testigo. Mientras tanto para la variable de diámetro polar las nanopartículas de yoduro de potasio y el yoduro de potasio mostraron en aumentando del 28% en comparación con el testigo de acuerdo a la prueba LSD Fisher ($\alpha = 0.05$). Las NPs pueden penetrar los tejidos vegetales cuando se aplican sobre las hojas de las plantas en forma de aspersión, penetrando por los estomas y desplazándose luego por el floema hacia diferentes tejidos de las plantas, lo que permite una mayor translocación de azúcares a órganos de demanda (Liu *et al.*, 2015). Así mismo, las NPs de KI estimulan los procesos fisiológicos de las plantas, mejorando la capacidad y asimilación de nutrientes (Rivera *et al.*, 2024), lo que podría afectar el diámetro ecuatorial y polar de los frutos.

Tabla 5. Efecto de aplicaciones foliares de nanopartículas (Nps) de quitosán y yodo en la productividad del cultivo de fresa.

Tratamiento	Diámetro ecuatorial del fruto (mm)	Diámetro polar del fruto (mm)	Peso promedio de fruto (gr)	Numero de fruto/planta	Rendimiento por planta
Testigo absoluto (H2O)	2.67 d	3.09 c	8.30 c	3.40 a	28.60 b
NPSQ5 Nps de quitosán	2.72 d	3.28 bc	14.09 a	3.67 a	51.18 a
KIO3 Yodato de Potasio	3.21 c	3.68 ab	12.40 ab	3.25 a	39.54 ab
KI Yoduro de Potasio	3.47 bc	3.95 a	11.45 b	3.38 a	38.52 ab
KIO3 Nps Yodato de Potasio	3.76 ab	3.79 a	13.02 ab	3.63 a	47.45 a
KI NPS Nps de Yoduro de Potasio	3.99 a	3.94 a	13.91 a	3.88 a	53.25 a
C.V	8.77	10.52	18.67	32.44	36.52
p	<0.0001	0.0005	0.0006	0.9037	0.0862

C.V= Coeficiente de variación. Medidas con la misma letra no son significativamente diferentes LSD ($p < 0.05$).

En los niveles de peso promedio de fruto que se muestran en la tabla a Tabla 5 se puede ver que hubo una diferencia significativa entre los tratamientos. Donde las nanopartículas de quitosán presentaron los valores medios más altos con 14.09 g seguido del tratamiento con nanopartículas de yoduro de potasio el cual mostro un incremento del 68% en comparación con el testigo. Algunos estudios, señalan que la aplicación de NPsCs mejora la actividad metabólica y el transporte de fotosintatos de manera más eficiente a través de las membranas celulares, permitiendo un mayor aprovechamiento de moléculas activas, incrementando el crecimiento y el rendimiento de las plantas (Rivera, 2024). Con estos resultados, se puede confirmar que los complejos de NPsCs tuvieron una mejor absorción foliar y translocación hasta los frutos, que podría estar asociada al incremento de biomasa.

No se presentó una diferencia significativa entre los tratamientos de número de frutos por planta (Tabla 5), sin embargo cuando las plantas de fresa fueron tratadas con nanopartículas de yoduro de potasio se incrementó en un 15% el número de frutos al comparar los frutos producidos por la planta testigo. Lira *et al.*, (2018) menciona que al utilizar nanofertilizantes que contienen P y K se muestran efectos positivos en la floración de los cultivos, por lo tanto tiene relación con el hecho de haber usado el yodo (I) con las sales de KI y KIO₃.

El ANOVA y la prueba de comparación de medias con base en la prueba de LSD Fisher a un nivel de significancia de $\alpha 0.05$ permitieron evaluar las diferencias de los tratamientos sobre la estimación del rendimiento por planta. En la Tabla 5 de acuerdo al análisis de comparación de medias indica diferencias significativas entre los tratamientos. Al aplicar nanopartículas de yoduro de potasio se obtuvo un rendimiento del 86% mayor en comparación con el testigo. Sin embargo, se observa que al aplicar nanopartículas de quitosán también se obtienen valores altos de rendimiento con un promedio de 51.18 g por planta. Esto se le podría atribuir a la composición nanométrica del complejo, debido a que presentan una mayor efectividad con el uso de nanomateriales (NPs KI y NPsQs) con respecto al material original encontrando un efecto estimulante en el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Treviño *et.*, al 2024).

V. CONCLUSIONES

El efecto del uso de nanopartículas de quitosán y complejos yodatados se refleja en una menor conductancia estomática y por consiguiente menor apertura de los estomas, lo que generalmente se asocia con una menor acumulación de materia seca en las plantas. Sin embargo, al reducir la transpiración, la planta conserva agua, lo que puede ser beneficioso en condiciones de sequía o estrés hídrico.

Las nanopartículas de yoduro de potasio mostraron un efecto bioestimulante positivo en las variables agronómicas como el número de hojas y diámetro de corona.

El aplicar nanopartículas de yoduro de potasio en plantas de fresa se obtiene un efecto bioestimulante en la producción de los frutos reflejado en el incremento del tamaño, número y peso de los frutos, y por consiguiente el rendimiento por planta.

El peso promedio en frutos de fresa incrementa al aplicar nanopartículas de quitosán.

VI. REVISION DE LITERATURA

Alvarado-Cepeda, Y. A., Mendoza-Villarreal, R., Sandoval-Rangel, A., Vega-Chávez, J. L., & Franco-Gaytán, I. (2020). Calidad fisicoquímica y sensorial de frutos de fresas obtenidos en dos sistemas de cultivo. RIIIT. Revista internacional de investigación e innovación tecnológica, 8(43), 18-29.

Alvarado-Chávez, J. A., Gómez-González, A., Lara-Herrera, A., Díaz-Pérez, J. C., & García-Herrera, E. J. (2020). Rendimiento y calidad de fruto de fresa cultivada en invernadero en sistema hidropónico piramidal. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 11(8), 1737-1748.

Amaro Barranco, R. (2023). Efecto bioestimulante de complejos de nanopartículas de quitosán yodados en frutos de tomate.

Amaro Barranco, R., & Benavides Mendoza, A. (2023). Efecto bioestimulante de complejos de nanopartículas de quitosán yodados en frutos de tomate.

Anchondo-Páez, J. C., Sánchez-Chávez, E., Ramirez-Estrada, C. A., Salcido-Martínez, A., Ochoa-Chaparro, E. H., & Muñoz-Márquez, E. (2024). Eficacia de Nanopartículas de Silicio y Codasil® como Potenciales Bioestimulantes en Frijol Ejotero. Revista Terra Latinoamericana, 42.

Arguello Gómez, D. E., Guerrero Palacio, G. C., & Mechan Cepeda, D. (2019). Plan de negocio para la producción y comercialización de fresa hidropónica..

Botero-Hoyos, A., Garzón Cortés, G. D. P., & González Siabato, N. G. (2022). Oportunidades para crear valor y sostenibilidad en la producción de fresa. Revista EIA, 19(38),

Cadena Ardila, M. P. (2017). Estudio de factibilidad para el cultivo hidropónico de fresa (*Fragaria x ananassa* d). Facatativá Cundinamarca.

Cervantes Aldaco, J. A. (2020). Respuestas fisiológicas de semillas y plantas de *Cucumis sativus* a la forma de aplicación de NPsFe₂O₃ en condiciones de laboratorio y malla sombra.

Concha Sáenz, S. (2021). Respuesta del cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa* D.) Var. San Andreas a la fertilización orgánica y química en condiciones de invernadero.

Cortés-Flores, C., Rodríguez-Mendoza, M. N., Benavides-Mendoza, A., García-Cué, J. L., Tornero-Campante, M., & Sánchez-García, P. (2016). El yodo aumenta el crecimiento y la concentración de minerales en plántulas de pimiento morrón. *Agrociencia*, 50(6), 747-758.

Cortés-Flores, C., Rodríguez-Mendoza, M. N., Benavides-Mendoza, A., García-Cué, J. L., Tornero-Campante, M., & Sánchez-García, P. (2016). El yodo aumenta el crecimiento y la concentración de minerales en plántulas de pimiento morrón. *Agrociencia*, 50(6), 747-758.

Dario, H. C. R. (2020). Desarrollo morfológico y rendimiento de tres variedades de fresa mediante un sistema hidropónico nft cantón Guayaquil, guayas. Guayas (Doctoral Dissertation, Universidad Agraria del Ecuador).

Delgado Vargas, J., & Zavala Witrigo, J. J. (2025). Control orgánico de *Neopestalotiopsis* spp. En el cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch).

Espínola Alvarado, H. E. (2023). Complejos de nanoparticulas de quitosán yodados como inductores de tolerancia a *fusarium oxysporum* en el cultivo de tomate.

Franco Gaytán, I. V. A. N. (2017). Evaluación de atmósferas con alta concentración de CO₂ en la fisiología, calidad y control de pudriciones de variedades de fresa (*Fragaria ananassa*).

Garcés Montero, C. M. (2022). Evaluación de yodo agrícola como biofortificante en el cultivo de mora (*Rubus glaucus* Benth) (Bachelor's thesis).

García Fuentes, J. E. (2021). Efecto del yodo sobre el crecimiento, morfometría, minerales y antioxidantes en plantas de tomate sometidas a estrés por salinidad.

Garza Alonso, C. A. (2023). Efectividad de nano fertilizantes contra fertilizantes convencionales en cultivos sin suelo.

González Domínguez, M. D. L. Á. (2015). Calidad de planta madre y capacidad productiva de cultivares mexicanos de fresa en condiciones de invernadero (Master's thesis).

Grasso, R.; Berrueta, C.; Giménez, G. 2021. Monitoreo de nutrientes para la asistencia a la fertirrigación a nivel de predios. Revista INIA. no. 66: 108-112.

Guaqueta Huguet, S. D. D. P. (2019). Efectos de los factores climáticos de producción sobre la extracción de nitrógeno, calcio y potasio en cultivos de fresa (*Fragaria ananassa* Deuch cv Albión).

Incrocci L, Carmassi G, Maggini R, Poli C, Saidov D, Tamburini C, Kiferle C, Perata P, Pardossi A (2019) Iodine accumulation and tolerance in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) with green or purple leaves grown in floating system technique. *Frontiers in Plant Science* 10: 446748.

Jarillo Hernández, I. L. (2020). Efecto en la concentración de iones en la disolución del suelo y desarrolló del cultivo de col (*Brassica oleracea*) con la aplicación de quitosán como bioestimulante.

Javalera-Rincón, M. D. L., González-Fuentes, J. A., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Olivo, A., Lara-Reimers, E. A., & Morelos-Moreno, Á. (2024). Efecto de Bioestimulantes en Producción y Calidad de Fresa (*Fragaria ananassa* cv. Albión) Bajo Estrés Hídrico. *Terra Latinoamericana*, 42.

Javed, R.; Bilal, M.; Ali, J.S.; Khan, S.; Cheema, M. Nanotechnology: A Tool for the Development of Sustainable Agroindustry. In *Agricultural and Environmental Nanotechnology, Interdisciplinary Biotechnological Advances*; Fernández-Luqueño, F., Patra, J.K., Eds.; Springer Nature Singapore, 2023; pp. 317–339

Juárez-Maldonado A., Ortega-Ortíz H., Morales-Díaz A.B., González-Morales S., Morelos-Moreno Á., Cabrera-De la Fuente M., Sandoval-Rangel A., Cadenas-Pliego G., Benavides-Mendoza A (2019). Nanoparticles and nanomaterials as plant biostimulants. *Int. J. Mol.*

Lara-Izaguirre, A. Y., Rojas-Velázquez, Á. N., Alcalá-Jáuregui, J. A., Alia-Tejacal, I., Méndez-Cortés, H., & Hernández-Montoya, A. (2023). Biofortificación con yodo, actividad antioxidante y minerales en frutos de berenjena (*Solanum melongena* L.). *Revista fitotecnia mexicana*, 46(4), 399-407.

Leija-Martínez, P., Benavides-Mendoza, A., Rocha-Estrada, A., & Medrano-Macías, J. R. (2016). Biofortificación con yodo en plantas para consumo humano. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(8), 2025-2036.

Lira Saldivar, R. H., Méndez Argüello, B., Santos Villarreal, G. D. L., & Vera Reyes, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta universitaria*, 28(2), 9-24.

Liu, R. y Lal, R. (2015). Potencial de las nanopartículas de ingeniería como fertilizantes para aumentar la producción agronómica. *Science of the Total Environment*, 514, 131-139.

López Ramírez, L. Y. (2022). La concentración de la solución nutritiva y fibra de coco en el medio de crecimiento afecta el rendimiento de frutos de las plantas de fresa.

Magdaleno García, G., Juárez Maldonado, A. A., González Morales, S. C. A., & Martínez Amador, S. Y. C. A. (2017). Aplicación de Nanopartículas de Cobre en Hidrogeles de Quitosán para Promover la Tolerancia al Estrés Salino en Tomate (*Solanum lycopersicum* L.).

Mahecha Molina, J. G. (2018). Incidencia y severidad de los síntomas de deficiencia de fósforo en el cultivo de fresa (*Fragaria vesca* L.) en las condiciones de Pamplona y alternativas orgánicas para suplir la carencia de fósforo con productos orgánicos.

Manikandan A, Sathiyabama M (2016) Preparation of chitosan nanoparticles and its effect on detached rice leaves infected with *Pyricularia grisea*. *International Journal of Biological Macromolecules* 84: 58-61. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.11.083>

Marín-Bustamante, M. Q., Hernández-Flores, A., & Cásarez-Santiago, R. G. (2021). Nanotecnología y Agricultura: Detección, Monitoreo y Remediación de Contaminantes. *Revista Salud y Administración*, 8(23), 29-35.

Medrano Macías, J. R. (2017). Efecto de la aplicación de yodo sobre el metabolismo redox y expresión génica en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

Medrano-Macías, J., Leija-Martínez, P., González-Morales, S., Juárez-Maldonado, A., Benavides-Mendoza, A., 2016. "Uso de yodo para biofortificar y promover el crecimiento y la tolerancia al estrés en los cultivos. *Frente. ciencia de las plantas* 7, 1–20."

Melgoza, F. A. G., Escalante, F. B., Cavazos, C. J. L., Torres, V. R., de las Nieves Rodríguez-Mendoza, M., Fuentes, J. A. G., & Mendoza, A. B. (2016). Respuesta de las plantas de melón a las aplicaciones de yoduro de potasio. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (17), 3465-3475.

Méndez-Argüello, B., Vera-Reyes, I., Mendoza-Mendoza, E., García-Cerda, L. A., Puente-Urbina, B. A., & Lira-Saldívar, R. H. (2016). Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova scientia*, 8(17), 140-156.

Meneses Lazo R. E. (2020). Absorción, distribución y acumulación de nutrientes en plántulas de chile habanero con inoculantes microbianos. *Tecnológico Nacional de México*.

Niño Méndez, H. (2020). Identificación de hexápodos asociados al cultivo de fresa (*Fragaria* spp.) en la vereda el rosal, municipio de Pamplona, Norte de Santander.

Peña, L., Rentería, V., Velásquez, C., Ojeda, M. L., & Barrera, E. (2019). Absorbancia y reflectancia de hojas de *Ficus* contaminadas con nanopartículas de plata. *Revista mexicana de física*, 65(1), 95-105.

Pérez Buendía, B. A. (2020). Evaluación de tres sistemas de producción de fresa (*Fragaria vesca* L.) (Master's thesis).

Pérez Buendía, B. A. (2020). Evaluación de tres sistemas de producción de fresa (*Fragaria vesca* L.) (Master's thesis).

Pérez Gómez, N. P. (2021). Efecto de las nanopartículas de quitosán (NPs CS) en la producción y calidad de la lechuga (*Lactuca sativa* L.).

Pérez-Madruga, Y., Rosales-Jenquis, P. R., Menéndez, D. C., & Falcón-Rodríguez, A. (2019). Aplicación combinada de quitosano y HMA en el rendimiento de maíz. *Cultivos Tropicales*, 40(4).

Rivas-García, T., González-Gómez, L. G., Boicet-Fabré, T., Jiménez-Arteaga, M. C., Falcón-Rodríguez, A. B., & Terrero-Soler, J. C. (2021). Respuesta agronómica de dos variedades de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a la aplicación del bioestimulante con quitosano. *Terra Latinoamericana*, 39.

Rivera-Solís, L. L., Ortega-Ortiz, H., Benavides-Mendoza, A., Flores-López, M. L., Robledo-Olivo, A., & González-Morales, S. (2024). Efecto bioestimulante de nanoquitosán-yodo en el crecimiento y vigor de plantas de tomate. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 11(2).

Ross, N. (2017). Hidroponía: la guía completa de hidroponía para principiantes. Babelcube Inc..

SAGARPA. 2017. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Fresa Mexicana. 20p.

SALDIVAR, R. H. L. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura sustentable.

Sánchez Ortiz, N. E. (2022). Evaluación de las propiedades bioestimulantes de dos productos alternativos en tres variedades de fresa (*Fragaria x ananassa*) en la parroquia Montalvo, provincia de Tungurahua (Bachelor's thesis).

Sánchez, M. M. (2015). Efecto de *Bacillus Subtilis* sobre el rendimiento, desarrollo y propiedades nutraceuticas de fresa. Jiquilpan, Michoacán, México: Instituto Politecnico Nacional.

SENASICA. 2024. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. México. 2-20.

SIACON. 2023. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. Modulo agrícola estatal del SIACON-NG. México: SIAP-SADER. <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>.

Solis Salazar, J. S. (2023). Asistente electrónico de agricultura hidropónica aplicando Machine Learning.

Torres Linares, F. (2023). Respuesta de plantas de fresa (cv. albión) a las aplicaciones de silicio y ácidos húmicos.

Torres Rodríguez, M. E. (2024). Análisis espacial de la especialización municipal de la producción de fresa en México, 2003-2020.

Tovar González, E., Alvarado Camarillo, D., Baylon Palomino, A., Valdez Aguilar, L. A., & Peña Olvera, V. S. (2023). Efecto del calcio en el rendimiento y calidad del fruto en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) en ambiente controlado bajo diferentes intensidades de luz.

Treviño-Ruiz, K. S., Ortega-Ortiz, H., Benavides-Mendoza, A., & González-Morales, S. (2024). Aplicación de nanoquitosán-yodo en lechuga y su efecto en la biofortificación, crecimiento y rendimiento. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 11(2).

Urdiales-Ponce, V., & Espín-Ortega, J. (2018). Monitoreo de un sistema hidropónico NFT a escala usando arquitectura arduino (PARTE 1). *Revista Tecnología en Marcha*, 31(2), 147-158.

Valencia, G. A. (2015). Efecto antimicrobiano del quitosano: una revisión de la literatura. *Scientia Agroalimentaria*, 2.

Vázquez López, M. S. (2016). Efecto de las nanopartículas de Cu introducidas en quitosán sobre el crecimiento, desarrollo y contenido de licopeno en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo invernadero.

Vázquez Roque, J. D. J. (2022). Aplicación de nps ca para inducir la producción de biocompuestos en frutos de tomate cultivado bajo estrés Salino.

Vázquez-Núñez, E. (2023). Uso de nanomateriales en la agricultura y sus implicaciones ecológicas y ambientales. Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología, 16(30).

Velasco, E. S. (2019). Aplicación de compuestos yodados para la biofortificación de hortalizas. CIQA.

VII. ANEXOS

7.1. Análisis de la varianza en el crecimiento vegetativo y conductancia estomática.

NUM HOJAS

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NUM HOJAS	47	0.42	0.35	19.65

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	170.50	5	34.10	6.03	0.0003
TRATAMIENTO	170.50	5	34.10	6.03	0.0003
Error	231.96	41	5.66		
Total	402.47	46			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=2.43025

Error: 5.6577 gl: 41

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
nps yoduro k	14.75	8	0.84	A
yoduro K	14.63	8	0.84	A
nps yodato k	11.50	8	0.84	B
Testigo	11.00	8	0.84	B
yodato k	10.43	7	0.90	B
NCs	10.13	8	0.84	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

DIAMETRO DE CORONA

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
DIAMETRO DE CORONA	41	0.34	0.25	34.37

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	361.83	5	72.37	3.68	0.0088
TRATAMIENTO	361.83	5	72.37	3.68	0.0088
Error	687.92	35	19.65		
Total	1049.75	40			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=4.89365

Error: 19.6550 gl: 35

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
nps yoduro k	16.51	7	1.68	A
yodato k	15.68	6	1.81	A B
NCs	14.66	7	1.68	A B
nps yodato k	11.91	8	1.57	A B C
yoduro K	10.69	7	1.68	B C
Testigo	7.73	6	1.81	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

PESO FRESCO

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PESO FRESCO	39	0.41	0.32	33.36

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3482.44	5	696.49	4.53	0.0030
TRATAMIENTO	3482.44	5	696.49	4.53	0.0030
Error	5079.19	33	153.91		
Total	8561.63	38			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=14.04262

Error: 153.9149 gl: 33

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
Testigo	56.28	6	5.06	A	
nps yoduro k	40.27	6	5.06	B	
NCs	35.88	7	4.69	B	C
yodato k	34.69	7	4.69	B	C
nps yodato k	33.52	7	4.69	B	C
yoduro K	23.72	6	5.06		C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

PESO SECO

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PESO SECO	39	0.53	0.46	36.58

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	961.26	5	192.25	7.50	0.0001
TRATAMIENTO	961.26	5	192.25	7.50	0.0001
Error	845.53	33	25.62		
Total	1806.79	38			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=5.72950

Error: 25.6222 gl: 33

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
Testigo	23.86	7	1.91	A	
yodato k	13.64	7	1.91	B	
nps yoduro k	13.12	6	2.07	B	
NCs	12.16	7	1.91	B	
yoduro K	10.09	6	2.07	B	
nps yodato k	8.82	6	2.07	B	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

CONDUCTANCIA ESTOMATICA

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CONDUCTANCIA ESTOMATICA	20	0.22	0.00	21.82

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1182.58	5	236.52	0.80	0.5656

TRATAMIENTO	1182.58	5	236.52	0.80	0.5656
Error	4121.24	14	294.37		
Total	5303.82	19			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=28.76697

Error: 294.3743 gl: 14

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
yodato k	86.50	3	9.91	A
ncs	84.88	4	8.58	A
testigo	84.47	3	9.91	A
nps yoduro k	80.40	3	9.91	A
nps yodato k	68.70	4	8.58	A
yoduro K	68.07	3	9.91	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

7.2. Análisis de varianza de parámetros productivos.

DIAMETRO ECUATORIAL

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
DIAMETRO ECUATORIAL	43	0.75	0.72	8.77

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9.74	5	1.95	22.67	<0.0001
TRATAMIENTO	9.74	5	1.95	22.67	<0.0001
Error	3.18	37	0.09		
Total	12.92	42			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.31638

Error: 0.0859 gl: 37

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
nps yoduro k	3.99	7	0.11	A
nps yodato k	3.76	8	0.10	A B
yoduro K	3.47	8	0.10	B C
yodato k	3.21	8	0.10	C
NCs	2.72	6	0.12	D
Testigo	2.67	6	0.12	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

DIAMETRO POLAR

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
DIAMETRO POLAR	44	0.43	0.36	10.52

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4.27	5	0.85	5.76	0.0005
TRATAMIENTO	4.27	5	0.85	5.76	0.0005
Error	5.64	38	0.15		
Total	9.91	43			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.41108

Error: 0.1484 gl: 38

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
yoduro K	3.95	8	0.14	A	
nps yoduro k	3.94	8	0.14	A	
nps yodato k	3.79	8	0.14	A	
yodato k	3.68	8	0.14	A	B
NCs	3.28	6	0.16		B C
Testigo	3.09	6	0.16		C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

PESO PROM

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PESO PROM	44	0.42	0.35	18.67

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	146.15	5	29.23	5.56	0.0006
TRATAMIENTO	146.15	5	29.23	5.56	0.0006
Error	199.92	38	5.26		
Total	346.07	43			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=2.44727

Error: 5.2611 gl: 38

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
NCs	14.09	6	0.94	A	
nps yoduro k	13.91	8	0.81	A	
nps yodato k	13.02	8	0.81	A	B
yodato k	12.40	8	0.81	A	B
yoduro K	11.45	8	0.81		B
Testigo	8.30	6	0.94		C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

NUM FRUTO-PLANTA

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NUM FRUTO-PLANTA	43	0.04	0.00	32.44

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2.04	5	0.41	0.31	0.9037
TRATAMIENTO	2.04	5	0.41	0.31	0.9037
Error	48.66	37	1.32		
Total	50.70	42			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=1.24889

Error: 1.3151 gl: 37

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
nps yoduro k	3.88	8	0.41	A	
NCs	3.67	6	0.47	A	
nps yodato k	3.63	8	0.41	A	
Testigo	3.40	5	0.51	A	
yoduro K	3.38	8	0.41	A	
yodato k	3.25	8	0.41	A	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

RENDIMIENTO-PLANTA

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RENDIMIENTO-PLANTA	43	0.22	0.12	36.52

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2685.99	5	537.20	2.11	0.0862
TRATAMIENTO	2685.99	5	537.20	2.11	0.0862
Error	9430.01	37	254.87		
Total	12116.01	42			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=17.38606

Error: 254.8652 gl: 37

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
nps yoduro k	53.25	8	5.64	A
NCs	51.18	6	6.52	A
nps yodato k	47.45	8	5.64	A
yodato k	39.54	8	5.64	A B
yoduro K	38.52	8	5.64	A B
Testigo	28.50	5	7.14	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)