



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
INGENIERÍA EN AGRONOMÍA PARA LA PRODUCCIÓN
SUSTENTABLE**

TESIS

**Influencia de la aplicación foliar de quitosano y silicato de potasio en el
crecimiento, productividad y calidad postcosecha de fresa (*Fragaria x
ananassa*)**

**Para obtener el título de
Ingeniero agrónomo**

Presenta

Alejandro Espinosa Pérez

Director

Dr. Zeus Huitzilopochtli Pinedo Guerrero

Co-Directora

Dra. Hortensia Ortega Ortiz

Comité tutorial

Dra. Josefa Espitia López

Dr. Benito Flores Chávez

**Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo., México., 26 de Mayo de
2026**



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Institute of Agricultural Sciences

Área Académica de Ciencias Agrícolas y Forestales

Academic Area of Agricultural and Forestry Sciences

Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hgo., a 26 de mayo de 2026

Asunto: Autorización de impresión

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UA EH

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado al pasante de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía para la Producción Sustentable, **Alejandro Espinosa Pérez**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado **"Influencia de la aplicación foliar de quitosano y silicato de potasio en el crecimiento, productividad y calidad postcosecha de fresa (*Fragaria x ananassa*)"**, que después de revisarlo en reunión de comité de tesis, ha decidido autorizar la impresión de este, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los miembros del comité de tesis:

DIRECTOR	DR. ZEUS HUITZILOPOCHTLI PINEDO GUERRERO
CODIRECTOR	DRA. HORTENSIA ORTEGA ORTIZ
ASESOR	DRA. JOSEFA ESPITIA LOPEZ
ASESOR	DR. BENITO FLORES CHAVEZ

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

1961 - 2026

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

DR. SERGIO RUBEN PEREZ RIOS
Coordinador nombre del P.E.

"Amor, Orden y Progreso"



Av. Universidad No. 133, Col. San Miguel Huatengo, Santiago
Tulantepec. C.P. 43775. Hidalgo, Mexico.
Teléfono: 7717172000 Ext. 42073
profe_5566@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por otorgar la inteligencia, la salud y la fortaleza necesaria para culminar esta importante etapa, siendo mi guía en cada paso del camino, especialmente en los momentos de mayor exigencia.

A mis padres, por ser mi motor y mi apoyo incondicional. Gracias por sus sacrificios, su amor infinito y por creer en mí y en mis proyectos desde el primer día.

A mi familia y amigos, por estar siempre presentes, por sus palabras de aliento, su respaldo constante en cada jornada y por hacer este trayecto más ligero con su compañía y cariño.

A mí mismo, por la perseverancia, el esfuerzo constante y la resiliencia. Por mantener la disciplina en los días difíciles, no rendirme ante las adversidades y demostrarme que con dedicación y coraje siempre es posible salir adelante y alcanzar las metas propuestas.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) y al Instituto de Ciencias Agropecuarias (ICAp), por abrirme sus puertas y cobijarme en sus aulas, brindándome no solo las herramientas técnicas y científicas, sino también el orgullo de pertenecer a esta gran institución.

A mis directores de tesis, el Dr. Zeus Huitzilopochtli Pinedo Guerrero y la Dra. Hortensia Ortega Ortiz, por su invaluable guía, su paciencia, su rigor científico y por compartir conmigo su conocimiento para consolidar esta investigación.

A mi comité tutorial, la Dra. Josefa Espitia López y el Dr. Benito Flores Chávez por su tiempo y apoyo en toda mi formación académica, así como a todos los profesores que formaron parte de este proceso. Gracias por su exigencia en las aulas y en el campo, la cual fue fundamental para moldear mi visión profesional como ingeniero agrónomo.

DEDICATORIAS

Con amor y gratitud a mis padres, quienes con su guía y crianza sembraron en mí el deseo de superación para poder ser una profesionalista.

A mi familia y amigos, pilares fundamentales en cada jornada de este camino. Este logro es para ustedes.

RESUMEN

El cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa*) es de gran importancia económica y nutricional a nivel mundial, pero su productividad y calidad de fruto a menudo sufre pérdidas y bajos rendimientos debido a una serie de factores que afectan directamente el cultivo como lo son, plagas, patógenos, estrés salino, malos manejos nutricionales o factores de clima. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de las aspersiones foliares de quitosano y silicato de potasio a diferentes concentraciones (200 mg/L 400 mg/L 600 mg/L) con el objetivo de mejorar el rendimiento, la calidad del fruto, la resistencia a plagas y enfermedades de la fresa bajo condiciones de invernadero en la comunidad de Tecocomulco De Juárez, Hidalgo. Se implementó un diseño completamente al azar con 8 tratamientos y 3 repeticiones, midiendo variables de crecimiento, rendimiento y calidad postcosecha. Los resultados mostraron diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$) en las variables de crecimiento y rendimiento. El tratamiento con silicato de potasio a 200 mg/L incrementó hasta en un 92% el número de hojas respecto al testigo, mientras que la combinación de quitosano y silicato de potasio favoreció el número de frutos y el peso promedio por planta. En cuanto a calidad, los frutos tratados presentaron mayor firmeza, incremento en grados °Brix y mejor acidez titulable, prolongando la vida de anaquel. Estos hallazgos confirman que la aplicación foliar de quitosano y silicato de potasio, de manera individual y combinada, mejora significativamente el crecimiento vegetativo, la productividad y la calidad postcosecha de la fresa, constituyendo una alternativa sostenible frente al uso excesivo de agroquímicos sintéticos.

Palabras clave: Fresa, Quitosan, Silicato de potasio, Calidad poscosecha

ABSTRACT

Strawberry (*Fragaria × ananassa*) is of great economic and nutritional importance worldwide, yet its productivity and fruit quality often suffer losses and low yields due to several factors such as pests, pathogens, salinity stress, poor nutritional management, and climatic conditions. This research aimed to evaluate the efficiency of foliar sprays of chitosan and potassium silicate at different concentrations (200, 400, and 600 mg/L) to improve yield, fruit quality, and resistance to pests and diseases under greenhouse conditions in Tecocomulco de Juárez, Hidalgo. A completely randomized design with 8 treatments and 3 replications was implemented, measuring growth, yield, and postharvest quality variables. Results showed statistically significant differences ($\alpha < 0.05$) in growth and yield parameters. Potassium silicate at 200 mg/L increased leaf number by up to 92% compared to the control, while the combination of chitosan and potassium silicate enhanced fruit number and average fruit weight per plant. Regarding quality, treated fruits exhibited greater firmness, higher soluble solids ($^{\circ}\text{Brix}$), and improved titratable acidity, extending shelf life. These findings confirm that foliar application of chitosan and potassium silicate, individually and in combination, significantly improves vegetative growth, productivity, and postharvest quality of strawberry, representing a sustainable alternative to the excessive use of synthetic agrochemicals.

Keywords: Strawberry, Chitosan, Potassium silicate, Postharvest quality.

ÍNDICE

Contenido

ÍNDICE	7
1. INTRODUCCIÓN	9
2. OBJETIVOS.....	11
2.1. Objetivo general	11
2.2. Objetivo específico	12
3. HIPÓTESIS.....	12
4. JUSTIFICACIÓN	12
5. MARCO TEÓRICO	13
5.1. El cultivo de fresa (Fragaria × ananassa).	13
5.2. Importancia económica.	13
5.3. Taxonomía y fisiología de la planta	14
5.4. Variedades comerciales de fresa (Fragaria x ananassa).....	15
5.5 Condiciones climáticas	17
5.6. Características de suelo.....	18
5.7. Manejo nutricional	19
5.8. Plagas y enfermedades.....	21
5.9. Otros factores a considerar	22
6. Quitosano.....	23
6.1. Definición y características del quitosano.....	23
6.2. Funciones y aplicaciones en la agricultura	23
7. Silicato de potasio	25
7.1. Definición y propiedades del silicato de potasio	25
7.2. Funciones y efectos en el cultivo de fresa.....	25
7.3. Resultados experimentales y aportes reportados en la literatura	26
8. EFECTO DEL SILICATO DE POTASIO + QUITOSANO.....	27
8.1. Mecanismo y funciones del quitosano con el silicato de potasio	27

8.2. Resultados experimentales y efectos sinérgicos del quitosano y el silicato de potasio	28
9. MATERIALES Y MÉTODOS	30
9.1. Ubicación y condiciones experimentales	30
9.2. Preparación del terreno	30
9.3 Sistema de riego.....	31
9.4 Material vegetal y trasplante.....	31
9.5 Desinfección y preparación pretrasplante.....	31
9.6 Manejo agronómico del cultivo	32
9.7. Aplicaciones foliares.....	34
9.8 Control fitosanitario.....	36
9.9 Condiciones ambientales y monitoreo	39
9.9.1. Problemas fitosanitarios y adecuaciones durante el ciclo	40
9.10. Diseño experimental y tratamientos.....	40
9.10.1. Aplicación de tratamientos y manejo agronómico	41
9.10.2. Variables de crecimiento vegetativo	42
9.10.3. Variables de rendimiento y calidad postcosecha.....	43
9.10.4. Evaluación en laboratorio de poscosecha.....	43
9.10.5. Parámetros físicos y de rendimiento	43
9.10.6. Sólidos Solubles Totales (°Brix) y pH.....	44
9.10.7. Acidez titulable	44
9.11. Análisis estadístico	45
10. Resultados y discusión	45
11. CONCLUSIONES	58
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa Duch.*), es una especie de herbácea estolonífera de hábito perenne de la familia Rosáceas, cuyo fruto, es clasificado botánicamente como receptáculo floral agregado o pseudofruto, ha experimentado un notable crecimiento agrícola global. Este crecimiento de superficies se debe al aumento de la creciente demanda de los consumidores, quienes priorizan sus atributos organolépticos distintos, su alta calidad organoléptica y de manera particular, sus propiedades funcionales y nutricionales derivadas de una elevada concentración de compuestos bioactivos tales como antocianinas, carotenoides y polifenoles totales (Giampieri et al., 2020; Afrin et al., 2020).

La explotación comercial de esta fragancia se lleva a cabo con éxito en regiones con microclimas templados subtropicales. La planta presenta un porte bajo y un tallo modificado conocido como corona, el cual posee la capacidad fisiológica de emitir estolones de manera acelerada para su propagación. Asimismo, su precocidad reproductiva y ciclo productivo eficiente permiten la diferenciación de yemas florales y posterior amarre de frutos en periodos cortos tras el trasplante definitivo (Husanin, A. M., & Sohail, M. 2024). Fisiológicamente, las variedades cultivadas se categorizan de acuerdo con su fotoperiodo en plantas de días corto y día neutro, factor que induce la floración y la estructura de la planta, además de a

la adaptación climática a distintas ventanas comerciales de producción a lo largo del año (Sonsteby, A., & Heide, O.M., 2020).

En el contexto agroempresarial de México, la fresa se posiciona como una de las berries de mayor socioeconómico y rentabilidad por unidad de superficie. Las entidades federativas de Michoacán, Guanajuato y Baja California lideran la producción y el volumen de exportación nacional (SIAP, 2024). Para el sector productor, la optimización de los rendimientos biológicos, la inducción de cosechas tempranas y la obtención de estándares de calidad externa e interna de excelencia constituyen directrices criticadas para satisfacer las estrictas normativas fitosanitarias de inocuidad y del mercado internacional (Navarro-Navarro et al., 2023).

A pesar de su relevancia económica, la cadena agroproductiva de la fresa enfrenta desafíos estructurales de gran envergadura. El uso desmedido de agroquímicos sintéticos para el control de plagas y patógenos vasculares, aunado al desequilibrio en el manejo nutricional, ha desencadenado graves problemas de degradación ambiental, inducción de resistencia biológica y alertas de seguridad alimentaria por trazas residuales. Adicionalmente, el fruto presenta una ventana de vida poscosecha extremadamente corta debido a su elevada tasa respiratoria, la ausencia de una cutícula cerosa protectora rígida y una alta susceptibilidad al daño mecánico y ablandamiento tisular. Estas limitantes estructurales provocan una rápida senescencia y colonización de patógenos fúngicos durante las operaciones de cosecha, transporte y almacenamiento en frío (Bhaskara Reddy et al., 2020; Hashmi et al., 2021).

Bajo esta premisa de sostenibilidad, las tendencias científicas actuales se orientan a la evaluación de inductores de resistencia y bio promotores metabólicos que maximicen la productividad y aumente la vida en anaquel del fruto. Entre estas alternativas poliméricas, el quitosano un polisacárido lineal derivado de la desacetilación de la quitina de crustáceos y soluble en soluciones ácidas diluidas, ha demostrado una alta eficiencia biológica. Este compuesto actúa como un elicitor exógeno capaz de mimetizar el ataque de patógenos, desencadenando la cascada de señalización de la resistencia sistémica adquirida (SAR). Su aplicación foliar y

en recubrimientos induce la síntesis de enzimas de defensa, disminuir la degradación de antocianinas y preservar la firmeza celular pre y postcosecha (Li et al., 2020; Romanazzi et al., 2022). Además, se ha documentado que el aporte de exógeno de quitosano estimula de forma directa el crecimiento vegetativo, optimiza los componentes del rendimiento y eleva el contenido de antioxidantes en el tejido foliar (Rahman et al., 2021).

De forma complementaria, el silicato de potasio emerge como una enmienda foliar estratégica de última generación. El silicio (Si) bioabsorbible se deposita ordenada debajo de la cutícula foliar en forma de sílice amorfo, desempeñando una función mecánica y bioquímica crucial en la mitigación de factores de estrés biótico (bloqueando el aparato bucal de insectos plaga y filamentos miceliales de hongos) y estrés abiótico (estrés térmico e hídrico), lo que incrementa sustancialmente la resiliencia celular. Su aspersión foliar mejora significativamente la tasa fotosintética neta reduce la transpiración cuticular y optimiza la rectitud de los folíolos, maximizando la intercepción de radiación fotosintéticamente activa (Rastogi et al., 2021; Teixeira et al., 2020). Por su parte, el potasio actúa en sinergia como principal osmorregulador celular encargado de la apertura estomática, la activación enzimática y la translocación masiva de azúcares y fotoasimilados hacia el fruto, determinado directamente su calibre, firmeza y concentración de sólidos solubles totales (Teixeira et al., 2020; Ahanger et al., 2020).

2. OBJETIVOS.

2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación foliar de quitosano y silicato de potasio, sobre el crecimiento vegetativo, el rendimiento y la calidad postcosecha de frutos de fresa (*Fragaria × ananassa*) bajo condiciones de invernadero.

2.2. Objetivo específico

- Determinar la influencia del quitosano y del silicato de potasio en el crecimiento vegetativo de plantas de fresa.
- Analizar el impacto de ambos compuestos en el rendimiento del cultivo de fresa.
- Evaluar la calidad poscosecha en frutos de fresa tratados con quitosano y silicato de potasio.

3. HIPÓTESIS

La aplicación foliar de quitosano y silicato de potasio, de manera individual y combinada, mejoran significativamente el crecimiento vegetativo, el rendimiento y la calidad postcosecha de la fresa, en comparación con el tratamiento testigo.

4. JUSTIFICACIÓN

El cultivo de fresa es un recurso agrícola de gran valor económico y nutricional. Sin embargo, enfrenta diversas limitaciones, entre ellas su corta vida postcosecha, la alta susceptibilidad a patógenos y las pérdidas de rendimiento ocasionadas por un manejo inadecuado. Además, el uso excesivo de agroquímicos sintéticos ha generado impactos negativos en el ambiente y en la seguridad alimentaria, lo que hace necesario buscar alternativas más sostenibles.

En este contexto, el quitosano y el silicato de potasio se presentan como opciones innovadoras. El primero destaca por sus propiedades bioestimulantes y antimicrobianas, mientras que el segundo fortalece la pared celular y mejora la tolerancia de la planta frente a diferentes tipos de estrés abióticos. La evaluación de su aplicación en condiciones controladas permitirá obtener información científica útil para los productores, favoreciendo una agricultura más eficiente, segura y respetuosa con el medio ambiente.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. El cultivo de fresa (*Fragaria* × *ananassa*).

El cultivo de fresa es una de las frutas con mayor valor comercial y nutrimental a nivel mundial en el mercado. Sus frutos son muy apreciados por su sabor, textura, forma distintiva, aroma y por su elevado contenido de vitamina C y compuestos fenólicos con una potente actividad antioxidante (Battino et al., 2021).

Estos pseudofrutos se caracterizan por ser ricos en vitamina C, antioxidantes naturales como las antocianinas y los flavonoides, consideradas como un alimento funcional estratégico y una pieza clave para mitigar el desarrollo de algunas enfermedades crónicas (Giampieri et al., 2022). Asimismo, se ha demostrado por diversas investigaciones que consumir las fresas con regularidad en la dieta diaria ayuda de forma contundente a la reducción del riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares, diabetes tipo II y procesos relacionados con el cáncer (Van de Velde et al., 2021).

5.2. Importancia económica.

El cultivo de fresa (*Fragaria* × *ananassa*) es uno de los más rentables en la agricultura de tipo intensiva, su valor de mercado a nivel global rebasa los 20 mil millones de dólares anuales (FAOSTAT, 2024). México, Estados Unidos y España son los principales países exportadores en el mundo, cubriendo más del 60% de la demanda de este producto (Horticulture Research, 2022).

Hablando de la producción intensiva que se practica en los campos de cultivo de fresa se emplea a más de 1.5 millones de personas en el mundo principalmente en zonas rurales, ayudando así con empleo en esas zonas y contribuyendo con la reducción de la pobreza rural (Journal of Agricultural Economics, 2023).

En nuestro contexto nacional, México cultiva un aproximado de 15,000 a 16,000 hectáreas al año de fresa, Dentro de los estados donde más se ve presencia del cultivo es en Michoacán (50%), Baja California (20%), Guanajuato (15%). Entre los años de 2015 y 2023 la superficie cultivada aumentó en un 35%, esto debido al

impulso en la demanda de exportación a países como EE.UU. y Canadá (Revista Fitotecnica Mexicana, 2024; SIAP, 2024)

Actualmente México produce entre 500,000 a 600,000 toneladas al año con rendimientos promedio de 35-40 toneles por hectáreas superior al global de 25 toneladas por hectárea, esto gracias a técnicas de agricultura protegida (Horticultura Internacional, 2023).

El valor de la producción de fresa dentro del territorio mexicano supera los 1,200 millones de dólares anuales, siendo el tercer país exportador a nivel mundial (FAOSTAT, 2024). Cerca del 85% de la producción se exporta, generando 70,000 empleos directos tanto en campo como en empaques (Jornal of Agribusiness in Developing Economies, 2022).

5.3. Taxonomía y fisiología de la planta.

Para la optimización de los rendimientos y el alcance de altos estándares de calidad comercial, es indispensable comprender el funcionamiento biológico del cultivo de fresa considerando la interacción de factores críticos como el clima, manejo agronómico, la nutrición y su comportamiento a nivel fisiológico.

Se sabe que la fresa es una planta perenne que se reproduce por semillas (enfocado principalmente al mejoramiento genético) y vegetativamente a través de estolones siendo esta última la forma más común de su comercialización (Husaini & Sohail, 2024).

Morfológicamente, la planta se caracteriza por una corona comprimida a nivel del suelo, de la cual emergen de forma continua las hojas nuevas, estolones, inflorescencias y raíces adventicias. Sus hojas trifoliadas y dispuestas en espiral, son clave para los procesos fisiológicos esenciales como la fotosíntesis ya que presenta una gran cantidad de estomas, estando ubicados principalmente en el envés, lo que las hace ser sensibles ante cualquier condición de estrés hídrico (Petran & Hoover, 2022; Xiao et al., 2021).

Su sistema radicular es de tipo fasciculado y superficial con aproximadamente el 75% de las raíces activas concentradas a los primeros 15 cm

del suelo, esta característica limita su acceso al agua y nutrientes lo puede provocar ser susceptible al estrés abiótico (Avendaño-Arrazate et al., 2023; Xiao et al., 2021).

El fruto es un eterio, un receptáculo floral carnoso y engrosado. El desarrollo del fruto sigue un patrón acropetal dentro del ramillete floral donde la flor primaria siempre produce la fruta de mayor calibre comercial sin embargo es altamente vulnerable a cambios ambientales bruscos de la región como lo son heladas tardías, estrés hídrico o daños mecánicos por alguna plaga o patógeno lo que puede reducir drásticamente su producción. (Husaini & Sohail, 2024).

A nivel fisiológico su proceso de transpiración es regulado por la apertura estomática y la translocación activa de fotoasimilados (azúcares) desde las hojas fuente hacia los frutos y raíces esto es crítico para determinar la calidad final de la cosecha. La eficiencia de estos procesos es influenciada en gran medida por el manejo agronómico. Un exceso de nitrógeno provoca follaje excesivo, mientras que una poda ineficiente reduce la penetración de luz, limitando la tasa fotosintética de la planta. Asimismo, se genera una ventilación deficiente dando condiciones propicias para la proliferación de enfermedades fúngicas (Taghavi et al., 2020; Zhang et al., 2023).

5.4. Variedades comerciales de fresa (*Fragaria x ananassa*)

Más allá de los factores fisiológicos, taxonómicos y de manejo agronómico, es crucial comprender la interacción genotipo-ambiente inherente a la planta para lograr un cultivo exitoso y con alta productividad. En este sentido, la elección de la variedad o cultivar es fundamental y está determinada principalmente por el fotoperiodo (longitud del día) y el termoperiodo (oscilación de la temperatura), factores que regulan directamente la transición de la fase vegetativa a la reproductiva (Samtani et al., 2022; Sørnsteby & Heide, 2020).

Comercialmente, los cultivares de fresa se clasifican en dos grandes grupos según su respuesta al fotoperiodo:

Cultivares de día corto: Estas variedades se caracterizan por iniciar la diferenciación de sus yemas florales únicamente cuando las horas de luz diaria son inferiores a un umbral crítico, generalmente menor a 14 horas, y bajo condiciones de temperatura moderada a baja (Rowley et al., 2021). Si las plantas se exponen a días largos o temperaturas elevadas, el meristemo interrumpe la inducción floral y redirige la energía hacia la propagación vegetativa mediante la emisión masiva de estolones. Entre las principales variedades de día corto destacan 'Camarosa', reconocida históricamente por su alta productividad, precocidad y firmeza de fruto; 'Camino Real', un cultivar de porte compacto, alta resistencia al estrés ambiental y frutos de color rojo biointensivo; así como 'Benicia', 'Chandler', 'Mojave' y 'Ventana', las cuales permiten planificar ventanas de producción tempranas en regiones con inviernos benignos (Rowley et al., 2021; Sønsteby & Heide, 2020).

Cultivares de día neutro: A diferencia del grupo anterior, estas variedades poseen la capacidad de diferenciar yemas florales de manera continua e independiente de la longitud del día, lo que permite un flujo de producción prolongado y constante a lo largo del año, típicamente desde la primavera hasta el invierno (Andrés-Meza et al., 2023). No obstante, su talón de Aquiles es el factor térmico, ya que el proceso de floración y amarre de fruto disminuye drásticamente o entra en latencia abortiva cuando las temperaturas ambientales superan de forma sostenida los 30 a 35 °C, acelerando además la senescencia foliar.

Dentro de las variedades de día neutro más sobresalientes en los sistemas de producción tecnificada se encuentran:

- Albión: Considerada el estándar de oro en cuanto a calidad postcosecha debido a la alta firmeza de su pulpa, consistencia macroestructural, elevado contenido de azúcares y excelente vida de anaquel, aunque requiere de un manejo nutricional riguroso debido a su crecimiento erecto y moderado vigor vegetativo.
- Monterrey: Un cultivar de fuerte vigor vegetativo, con un sistema radicular robusto y una tolerancia discretamente superior al estrés por calor en comparación con 'Albión'. Produce frutos de gran calibre, simétricos y con una alta tasa de emisión de coronas secundarias.

- San Andreas y Seascape: Variedades caracterizadas por su alta precocidad y capacidad de mantener una producción estable en las etapas iniciales del ciclo agronómico (Andrés-Meza et al., 2023; Rowley et al., 2021).

En el contexto de la agricultura protegida, el uso de cultivares de día neutro ha cobrado un auge definitivo, ya que la estabilidad microclimática proporcionada por las estructuras plásticas optimiza las tasas fotosintéticas netas y mitiga las fluctuaciones térmicas extremas, permitiendo exacerbar el potencial genético de estas variedades para obtener cosechas continuas y con los parámetros de calidad comercial exigidos por los mercados de exportación y consumo en fresco.

5.5 Condiciones climáticas

La producción de cualquier variedad está directamente sujeta a que se desarrolle dentro de un clima óptimo, clasificado como templado-frío, el rango de temperatura ideal para su crecimiento vegetativo y de producción es de entre 10°C y 26° C. Las temperaturas diurnas son de entre 18°C y 22°C estas son óptimas para la fotosíntesis, mientras que por las noches de 8°C a 13°C esto favorece la calidad del fruto, su tamaño, la acumulación de azúcares y su aroma (Heide & Sonstebly, 2020; Palencia et al., 2022). Para el manejo dentro del invernadero se recomienda una humedad relativa moderada de entre 65-75%. Se debe cuidar mucho este factor, ya que una humedad por encima del 85% puede provocar el desarrollo de enfermedades fúngicas como el mildiu (*Podospharea aphanis*) y la podredumbre gris (*Botrytis cinerea*) (Romanazzi et al., 2022; Sharma et al., 2023). La fresa también requiere de una alta luminosidad como un mínimo de 6 horas de sol directo al día, una mayor cantidad de radiación solar promueve a un aumento en la producción de fotoasimilados, lo que se traduce en que cosechamos frutos más firmes, de mayor tamaño, mejor sabor y una coloración más intensa r (Rastogi et al., 2021; Xu et al., 2021).

Dado que la altitud modifica las condiciones climáticas, principalmente la temperatura esto es un factor geográfico clave a considerar para alcanzar los parámetros ideales descritos. Por esta razón el rango de altitud para la producción óptima es de 1000 y 2800 metros sobre el nivel del mar (m s. n .m). A estas altitudes

se garantizan noches frescas y ya que la altitud influye en la temperatura es fundamental tomar en cuenta y satisfacer los requerimientos de horas frío (por debajo de 7°C) ya que la fresa requiere como mínimo 400 horas frío para romper la latencia de la yema y permitir una floración uniforme y vigorosa al iniciar el ciclo (Andres-Meza et al., 2023; Sonsteby & Heide, 2021).

5.6. Características de suelo

El éxito técnico y económico del cultivo de fresa está íntimamente ligado a las propiedades físicas, químicas y biológicas del sustrato o suelo donde se establece, debido a que *Fragaria x ananassa* posee un sistema radicular de tipo fasciculado, fibroso y predominantemente superficial, concentrando más del 80% de su biomasa radicular activa en los primeros 20 cm de profundidad. Esta condición anatómica vuelve a la planta altamente vulnerable a las fluctuaciones del entorno edáfico (Avendaño-Arrazate et al., 2023).

En términos de propiedades físicas, la textura ideal para el desarrollo óptimo de las raíces es la franco-arenosa. Esta configuración porosa ejerce una influencia crucial al garantizar un equilibrio entre la macroporosidad (que favorece un drenaje rápido y una aireación celular óptima) y la microporosidad (responsable de la retención de agua útil para la planta). Los suelos con texturas pesadas o arcillosas provocan con facilidad el estancamiento hídrico, desencadenando procesos de asfixia radicular que detienen la respiración celular y predisponen al cultivo al ataque de patógenos fúngicos letales del suelo, como *Phytophthora* spp. y *Verticillium* spp. Por el contrario, texturas excesivamente arenosas limitan drásticamente la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la retención de humedad, sometiendo a la planta a constantes episodios de estrés hídrico (Avendaño-Arrazate et al., 2023).

En cuanto a la dinámica química, el pH del suelo ejerce una influencia directa sobre el estado de ionización y la solubilidad de los nutrientes esenciales en la solución del suelo. El rango óptimo para el cultivo se sitúa entre 5.3 y 6.5. Dentro de estos límites, la disponibilidad de los macronutrientes y micronutrientes se encuentra en un balance ideal para la absorción radicular. Cuando el pH se eleva por encima de

6.5, se genera una inmovilización química de microelementos esenciales, particularmente el hierro (Fe) y el manganeso (Mn), los cuales precipitan en forma de óxidos insolubles. Esta condición impide su asimilación por las raíces, induciendo una severa clorosis férrica que restringe la síntesis de clorofila, comprometiendo severamente la tasa fotosintética neta, el vigor general de la planta y, en consecuencia, el rendimiento final (Hochmuth et al., 2020).

Finalmente, la salinidad es uno de los factores edáficos más restrictivos, ya que la fresa está catalogada fisiológicamente como una especie glucófita altamente sensible a las concentraciones salinas. Por ello, la conductividad eléctrica (CE) del suelo debe mantenerse estrictamente por debajo de 1.5 dS/m. Un incremento en la CE eleva el potencial osmótico de la solución del suelo, lo que dificulta que las raíces absorban agua, generando un fenómeno de "sequía fisiológica" aun en presencia de humedad. Este estrés osmótico provoca la acumulación tóxica de iones de cloruro (Cl^-) y sodio (Na^+) en las hojas, manifestándose como necrosis marginal en los folíolos, reducción del área foliar, deformación de frutos y un decremento drástico en la calidad comercial y firmeza de la fruta (De la Fuente et al., 2021).

5.7. Manejo nutricional

El manejo nutricional en la fresa es fundamental para lograr alcanzar los rendimientos óptimos y calidad de la fruta. Este se debe ajustar a las etapas fenológicas de la planta (Establecimiento, Crecimiento vegetativo, Inicio floral, Floración y cuaje, Maduración del fruto y postcosecha) considerando el sistema de cultivo, propiedades del suelo métodos de aplicación en la fertirrigación (Hochmuth et al., 2020). Tener una fertilización balanceada es crucial ya que un desequilibrio nutricional no solo afecta directamente la producción, sino que también provoca que la planta sea más susceptible al ataque de plagas y desarrollo de enfermedades fúngicas o bacterianas (Singh et al., 2021).

El nitrógeno (N) es el nutriente más crítico en el desarrollo; al momento de dosificar y aplicarlo se debe tener cuidado y dividirlo a lo largo del ciclo. Un exceso promueve un crecimiento vegetativo excesivo de hojas y estolones lo que afectaría la calidad de la fruta. Además, este follaje abundante aumenta la susceptibilidad de

enfermedades destructivas como moho gris (*Botrytis cinerea*) y elevar el riesgo a la lixiviación de nitratos en el perfil del suelo (Kruger et al., 2021; Taghavi et al., 2020).

Por su parte el fósforo (P) y el potasio (K) son esenciales para el desarrollo radicular, la fructificación, y calidad final del fruto. El P es vital para la transferencia de energía celular (ATP), estimulando el crecimiento radicular y el correcto cuajado de frutos. El K es clave como osmorregulador celular, encargándose de la apertura estomática, el transporte de azúcares, la síntesis de proteínas y la mejora de atributos de calidad como la acidez, el color, sabor y firmeza del fruto. Otro macroelemento con gran importancia es el calcio (Ca) dado que él es un nutriente crítico para la vida de anaquel de la fresa; su manejo es complejo debido su baja movilidad dentro de los tejidos vasculares de la planta, pero al ser un componente estructural indispensable de la pared celular, los frutos con una dosificación adecuada de Ca son más firmes y resistentes a daños mecánicos durante la cosecha y el transporte (Ahanger et al., 2020; Hochmuth et al., 2020; Teixeira et al., 2020).

Los micronutrientes dado que son requeridos en menores cantidades por la planta son de igual manera indispensables para el correcto funcionamiento de su metabolismo. El boro (B) y el zinc (Zn) son vitales para el desarrollo de nuevos pelos absorbentes en la raíz y el crecimiento continuo de follaje joven (Taghavi et al., 2020). El B de manera particular interactúa en la germinación del tubo polínico, el cuajado de frutos, y la integridad de la pared celular (De la fuente et al., 2021). Por otro lado, el hierro (Fe), manganeso (Mn) y cobre (Cu) actúa como cofactores enzimáticos esenciales en procesos vitales para la planta como los son la fotosíntesis y la respiración celular (Romero et al., 2020). Como ya se ha mencionado con anterioridad debemos recordar que la disponibilidad de todos los nutrientes tanto macro como micros están totalmente sujetos y limitados por los niveles de pH y la conductividad eléctrica (CE) presentes tanto de agua como en el suelo (Hochmuth et al., 2020).

5.8. Plagas y enfermedades

El control fitosanitario en el cultivo de fresa es uno de los retos más complejos para nosotros como productores, debido a que la planta posee tejidos succulentos, un hábito de crecimiento rastroso y un dosel denso que favorece microclimas húmedos. La presencia de plagas artrópodos afecta directamente el área foliar y afecta severamente la calidad comercial del fruto. Entre las plagas más devastadoras destaca la araña roja (*Tetranychus urticae*), un ácaro que se establece en el envés de la hoja absorbiendo los jugos celulares, lo que provoca una clorosis severa, defoliación y reduce drásticamente el vigor de la corona. De igual manera el trips (*Frankliniella occidentalis*) representa una amenaza constante durante la floración, ya que se alimenta de las estructuras florales y de los frutos en desarrollo, lo que causa abortos florales y deformaciones, lo que provoca pérdidas económicas en la cosecha (Liburd & Renkema, 2021; Price et al., 2022).

Por otro lado, los patógenos de origen fúngico representan el mayor riesgo de colapso para las unidades de producción en condiciones de alta humedad relativa o estrés hídrico. La podredumbre gris, causada por *Botrytis cinerea*, es la enfermedad más común en la etapa de la fructificación; este hongo momifica y cubre los frutos con un micelio grisáceo, penetrando principalmente por los pétalos durante la floración. En el follaje, la cenicilla o mildiu polvoriento (*Podosphaera aphanis*) afecta hojas, flores y frutos, presentándose como polvo blanco en el envés lo que demerita la tasa fotosintética (Romanazzi et al., 2022 Sharma et al., 2023).

Asimismo, las enfermedades de la corona y raíz han ido en aumento de manera alarmante los últimos años, destacando la marchitez por *Fusarium oxysporum f. sp. fragariae* y la podredumbre de corona por *Phytophthora spp.* Estos patógenos colonizan y destruyen los haces vasculares (xilema) obstruyendo el flujo de agua y nutrientes, lo que se traduce en necrosis interna de la corona de tono marrón-rojizo. Esta degradación del sistema radicular resulta letal y difícil de erradicar una vez establecida en el módulo, limitando severamente el rendimiento comercial (Koike & Gordo, 2021; Sanfuentes et al., 2022).

Para mitigar este complejo fitosanitario, es indispensable implementar un programa de manejo integrado de plagas y enfermedades (MIPE) de carácter

preventivo. Esto combinado con el control cultural mediante podas de sanidad, desinfección de herramientas, monitoreo de trampas cromáticas y humedades relativas por debajo del 85%. Finalmente, el control químico debe priorizar el uso de productos biorracionales y el uso de inductores de resistencia exógenos, programando siempre una rotación estricta de modos de acción (comités IRAC y FRAC) para evitar que plagas agresivas como *Tetranychus urticae* generen resistencia genética en la explotación (Liburd & Renkema, 2021; Romanazzi et al., 2022).

5.9. Otros factores a considerar

Las condiciones microclimáticas así como la calidad fisicoquímica del suelo y agua son factores limitantes críticos para la productividad y rentabilidad del cultivo de fresa. Debido a su sistema radicular fasciculado y marcadamente superficial de la planta, la hace extremadamente sensible al déficit hídrico, que reduce el tamaño y la calidad de la fruta. Es uno de los cultivos más sensibles a la salinidad. La conductividad eléctrica (CE) del suelo y agua de riego superior a 2.0 dS/m reduce rendimientos ya que se ve altera el potencial osmótico en la rizosfera, bloqueando la absorción activa de agua y la asimilación de nutrientes esenciales (Avendaño-Arrazate et al., 2023; De la fuente et al., 2021).

Por otra parte, la presencia de temperaturas superiores a 30 °C inhibe la fotosíntesis, interrumpen la polinización y reducen el cuajado de los frutos especialmente a las variedades de día neutro. Por el contrario, las heladas tardías provocan el congelamiento y la necrosis irreversible de las estructuras florales y frutos jóvenes. Ambas situaciones son cada vez más frecuentes e impredecibles debido al cambio climático (Palencia et al., 2022; Sonsteby & Heide 2021). Tener un buen balance nutricional óptimo es complejo.

Programar un balance nutricional óptimo en la solución de fertirrigación representa un desafío técnico complejo. La aplicación excesiva de nitrógeno (N), estimula el desarrollo vegetativo, reduce la resistencia mecánica de las paredes celulares, disminuyendo la firmeza del fruto en poscosecha, y eleva la susceptibilidad al ataque de plagas y fitopatógenos. Por ende, una fertilización

desbalanceada en cualquier otro macroelemento rompe la homogeneidad de la cosecha y demerita los parámetros de calidad comercial exigida por los mercados de alto valor (Kruger et al., 2021; Taghavi et al., 2020).

6. Quitosano

6.1. Definición y características del quitosano

El quitosano se define como un biopolímero natural de origen marino obtenido principalmente mediante la desacetilación alcalina de la quitina, un polisacárido estructural presente en el exoesqueleto de los crustáceos, paredes celulares de hongos y otros organismos. Esta molécula destaca por su solubilidad en soluciones ácidas diluidas y se caracteriza por ser biodegradable, no tóxico, biocompatible y con actividad antimicrobiana intrínseca (Malerba & Cerana, 2020; Nithin et al., 2020). Debido a sus propiedades bioactivas, de manera muy especial su capacidad elicitora para activar de forma anticipada los mecanismos de defensa naturales en plantas es una alternativa altamente sostenible frente al uso de agroquímicos sintéticos (Romanazzi et al., 2022; Vandana et al., 2023).

6.2. Funciones y aplicaciones en la agricultura

El quitosano actúa eficazmente como un bioestimulante y elicitor de respuestas de defensa de las plantas. Su aplicación ya sea vía foliar o mediante fertirrigación induce cambios fisiológicos, bioquímicos y moleculares que se traducen en mejoras significativas en el crecimiento, rendimiento y calidad comercial del cultivo de fresa. En términos morfológicos se presenta un mayor número de hojas trifoliadas por planta (alcanzando hasta 26.50 a los 120 Días después del trasplante DDT)), y una mayor altura del dosel vegetal (hasta de 18.10 cm) (Vandana et al., 2023)., Incremento en el rendimiento y calidad del fruto con un aumento del tamaño de una longitud de hasta 5.63 cm, diámetro de hasta 3.95 y peso del fruto de hasta 30.23 gramos (Vandana et al., 2023). Mayor número de flores y frutos por plantas de hasta 20.92 flores/planta y 20.75 frutos/planta (Vandana et al., 2023), incremento en rendimiento comercial de hasta 60% (341.25 g/planta vs 183.81 g/planta), mayor

contenido de sólidos solubles (Brix) de hasta 11,87° (Vandana et al.,2023) mayor firmeza y coloración.

Mejora la vida poscosecha aumentando la vida útil de 2.33 días hasta los 7.33 (Vandana et al., 2023) menor susceptibilidad a daños mecánicos y patógenos debido a la formación de una barrera semipermeable que reduce la respiración y la pérdida de agua (Nithin et al., 2020).

Induce a la biosíntesis de compuestos bioactivos en frutos: Antocianinas incrementos significativos (hasta 54.69 mg/100g), actividad antioxidante total: mediante un ensayo DPPH, mostró un aumento de hasta 1.7 veces (413.42 µg BHT/g de fruto), ácido ascórbico (vitamina C): incremento significativo (hasta 53.29 mg/100g) (Nithin et al., 2020).

Dentro de otros mecanismos que funcionan en la planta durante su aplicación se destacan: La inducción de genes relacionados con la fotosíntesis, metabolismo hormonal y biosíntesis de antioxidantes, reducción del estrés oxidativo mediante el aumento de la actividad antioxidante (Rahman et al., 2018). La activación de enzimas clave como la fenilalanina amonio liasa (PAL), involucrada en la ruta de los fenoles, creación de una barrera física que reduce la transpiración y la respiración de los frutos (Nithin et al., 2020).

6.3. Beneficios en el cultivo de la fresa por la aplicación de quitosano

La combinación de quitosano con dosis precisas y recomendadas de fertilizantes demostró tener un claro efecto sinérgico que optimiza los resultados en todos los parámetros evaluados. Específicamente, la aplicación vía foliar de una concentración de 4 g/L de quitosano en tres momentos críticos del ciclo (45, 90 y 120 días después del trasplante) complementado con una dosis recomendada de nutrientes resulta ser más efectiva (Vandana et al.,2023). Este manejo integrado actúa directamente a la protección fitosanitaria de la planta reduciendo de manera significativa la incidencia de enfermedades pre y poscosecha, es biodegradable y seguro (Rahman et al.,2018).

Bajo este parámetro, el quitosano ha demostrado ser una herramienta sustentable y de alta eficiencia para la producción comercial de fresa. Su valor tecnológico no se limita únicamente en la capacidad de aumentar rendimiento por

planta sino también por mejorar la calidad nutracéutica del fruto mediante la inducción y acumulación de compuestos bioactivos y antioxidantes. En consecuencia, su aplicación de manera foliar combinado de forma estratégica con los programas de fertilización recomendada maximiza de manera integral sus beneficios en crecimientos, rendimientos, calidad y vida útil en anaquel (Rahman et al., 2018; Vandana et al., 2023).

7. Silicato de potasio

7.1. Definición y propiedades del silicato de potasio

El silicato de potasio (K_2SiO_3) se define como una sal soluble de alta eficiencia que actúa como fuente dual de silicio (Si) y potasio (K), dos elementos esenciales del crecimiento óptimo y la activación de mecanismos de defensa estructural y bioquímica de las plantas. Cabe destacar que el silicio en su estado elemental no se encuentra disponible para la asimilación de las plantas; a diferencia de esto el silicato de potasio posee propiedades fisicoquímicas que permite su fácil absorción tanto vía radicular o foliar. Una vez absorbido por los tejidos o incorporado en la solución este compuesto se hidroliza de forma inmediata transformándose así en ácido silícico $[Si(OH)_4]$ que representa la forma biodisponible para que sea transportado activamente a través de su sistema vascular de la planta (Ahmed et al., 2022).

7.2. Funciones y efectos en el cultivo de fresa

La aplicación de silicato de potasio se ha hecho popular como una estrategia sostenible y altamente eficiente para mitigar los efectos del estrés biótico y abiótico en especies vegetales sumamente susceptibles como lo es la fresa (*Fragaria x ananassa*) (Wang et al., 2022). El silicio es absorbido por el sistema radicular principalmente en forma de ácido silícico, un proceso que es regulado a nivel molecular mediante la acción coordinada de transportadores específicos de flujo de entrada (influx, Lsi1) y de flujo de salida (efflux, Lsi2) (Pavlovic et al., 2021). Una vez dentro de los tejidos de la planta, este elemento se deposita de manera irreversible en el apoplasto fortaleciendo estructuralmente la pared celular mediante la

polimerización y formación de capas sólidas de sílice-fitólito. Este proceso crea una barrera física de alta resistencia mecánica que dificulta la penetración y el anclaje de hifas de hongos patógenos optimizando simultáneamente el área foliar (Wang et al., 2022).

Diferentes estudios demuestran que la aplicación exógena por vía foliar de silicato de potasio tiene efectos marcadamente positivos sobre las variables en el crecimiento, rendimiento y calidad comercial de la fresa.

Específicamente utilizando una dosificación técnica de 0.6 g/L se logró incrementar significativamente los siguientes parámetros morfológicos: Altura de la planta: 18.9 cm (testigo) a 20.14 cm, Peso fresco de la planta de 106.6 g (testigo) a 113.6g, número de hojas de 38.31 (testigo) a 44.61, Área foliar de 961.0 cm² (testigo a 1023.9 cm² (Nada, 2020).

Bajo esta misma dosis de manejo de silicato de potasio (0.6 g/L) las propiedades cualitativas muestran una notable optimización poscosecha registrando incrementos clave en los índices bioquímicos y físicos de calidad (Nada,2020) como: firmeza del fruto de 350.6 g/cm² (testigo) a 385.3 g/cm², sólidos solubles totales (SST) de 5.397% (testigo) a 6.198%, contenido de vitamina C de 57.50 mg/100g (testigo) a 62.67 mg/100 g, contenido de antocianinas de 52.78 mg/100g (testigo) a 56.27 mg/100g.

7.3. Resultados experimentales y aportes reportados en la literatura

El silicato de potasio demostró una alta efectividad para mitigar el estrés por bajas temperaturas durante la ventana de cosecha temprana (noviembre a febrero), la cual representa un periodo crítico para el mercado de exportación, esta inducción de tolerancia al frío se manifiesta a través de los siguientes mecanismos de fisiológicos y bioquímicos: Acumulación de solutos compatibles que promueve la síntesis y concentración de osmorreguladores clave como la prolina y la glicina betaína; Incremento de la actividad antioxidante, se evidencia mediante el aumento significativo en el contenido de carotenoides totales pasando de 22.80 mg/100g a 26.18 mg/100g (Nada, 2020), Favorece una mejora sustancial en la eficiencia fotosintética y en el estado hídrico de la planta (Arif et al., 2021). Paralelamente se demostró que este compuesto ejerce un efecto fungistático directo e induce una

respuesta de resistencia sistémica adquirida en el cultivo. En evaluaciones de manejo fitosanitario, la aplicación suelo y por vía foliar logró reducir la incidencia de enfermedades fúngicas, disminuyendo desde un 41.0% en el tratamiento testigo hasta apenas un 3.0% (Abd El-Kareem et al., 2019).

A nivel molecular, la asimilación de silicio (Si) activa la expresión y síntesis de proteínas relacionadas con patogénesis (PR) así como de diversas enzimas clave de defensa vegetal. Este mecanismo metabólico queda evidenciado en perfiles electroforético mediante geles SDS-PAGE, donde se manifiesta la aparición de entre 8 y 12 nuevas bandas proteicas reguladas en función de la fuente de silicio utilizada; este proceso se complementa de forma directa con una mayor biosíntesis de compuestos fenólicos y flavonoides que poseen una marcada actividad antimicrobiana intrínseca (Wang et al., 2017).

8. EFECTO DEL SILICATO DE POTASIO + QUITOSANO

8.1. Mecanismo y funciones del quitosano con el silicato de potasio

La combinación de ambos compuestos potencia de manera notable sus efectos individuales a través de mecanismos fisiológicos y estructurales que son completamente complementarios. Por un lado, el silicio se deposita de forma irreversible en el apoplasto de las células epidérmicas, reforzando mecánicamente la pared celular, mientras que el quitosano actúa de forma paralela formando una película protectora semipermeable sobre la superficie de los órganos aéreos. Esta doble acción consolida una barrera física de alta eficiencia que dificulta de forma crítica la germinación y la penetración de las esporas de diferentes patógenos (Lizárraga Paulin et al., 2019).

A nivel bioquímico y molecular, la combinación exógena actúa mediante una respuesta inmune más robusta en el vegetal. El quitosano desencadena de forma primaria la vía de señalización del ácido salicílico (asociada a la resistencia sistémica adquirida) mientras que el silicio estimula y potencia de forma paralela la ruta del ácido jasmónico (JA), la cual está vinculada con la defensa ante ataques de plagas y patógenos necrotróficos esta acción conjunta deriva una respuesta

sistémica integrada de mayor espectro (Silva et al., 2021). Asimismo, análisis a nivel transcriptómico confirman que la combinación de estos compuestos inducen la sobrerregulación de genes de quitinasas, glucanasas, fenilalanina amonio liasa (PAL) y peroxidasas logrando niveles de expresión de manera más significativa que su aplicación individual (Malerba & Cerana, 2020).

Por lo que respecta al crecimiento y desarrollo general del cultivo de fresa esta sinergia estimula fuertemente el vigor vegetativo y radicular. Evaluaciones experimentales destacan que la aplicación combinada de quitosano y silicio (QS+Si) induce el aumento del 45% en la longitud total de raíces en comparación con las plantas del tratamiento testigo (Hidangmayum et al., 2019).

Finalmente, la acción sinérgica entre ambos compuestos resulta ser una estrategia biológica altamente efectiva contra hongos fitopatógenos que atacan tanto al sistema foliar como al radicular. En condiciones de laboratorio y campo la aplicación combinada logró reducir la incidencia y severidad en el control de *Fusarium* spp. y *Rhizoctonia* spp (principales agentes causales de la podredumbre radicular y el secado de las plantas) en un 95% este valor supera drásticamente la eficacia comparada con el 78% del silicio por sí solo y el quitosano alcanza de forma individual un 65% (Hidangmayum et al., 2019). Este control superior se debe a un doble mecanismo antifúngico directo e indirecto: las cadenas poliméricas de quitosano interactúan con las cargas de las membranas celulares del hongo provocando su desorganización y lisis celular, mientras que el silicio hace más rígidas las paredes celulares de la planta e induce de forma simultánea la síntesis de fitoalexinas y compuestos fenólicos antimicrobianos (Lizarraga-Paulin et al., 2019).

8.2. Resultados experimentales y efectos sinérgicos del quitosano y el silicato de potasio

Se ha comprobado experimentalmente que la combinación de quitosano y silicato de potasio optimiza la regulación hídrica de la planta, mejorando significativamente la retención de agua y reduciendo la tasa de transpiración. Este fenómeno ocurre a través de una acción coordinada: el hidrocoloide del quitosano induce el cierre estomático parcial, mientras que la deposición de silicio refuerza los tejidos

epidérmicos de la planta (Silvia et al., 2021). Asimismo, esta sinergia mitiga de forma contundente el estrés por bajas temperaturas en rangos críticos (0-5°C), logrando reducir el índice de daño de la membrana celular en un 40% respecto al testigo sometido a estrés por frío (Hidangmayum et al., 2019).

En lo que respecta a la calidad postcosecha en frutos de fresa, el tratamiento combinado ha demostrado un impacto directo sobre la vida en anaquel. Las evaluaciones reportan un aumento del 25% en firmeza del fruto al momento de la cosecha, sumando una reducción de 90% en la incidencia de *Botrytis cinerea* durante el almacenamiento comercial.

Desde la perspectiva bioquímica, los frutos tratados muestran una estimulación metabólica secundaria que se traduce en un incremento significativo en la concentración de antocianinas, contenidos fenoles totales y capacidad antioxidante de la pulpa (Romanazzi et al., 2018).

Con base a las respuestas agronómicas analizadas se establece la siguiente pauta técnica para la dosificación y aplicación combinada de ambos compuestos en el ciclo productivo:

- Quitosano: Aplicación vía foliar a una concentración de 0.1% - 0.5% (p/v)
- Silicato de potasio: Aplicación foliar o mediante fertirriego a una dosis de 0.5 – 6 g/L.

Frecuencia en de la aplicación se recomienda elaborar un programa de 3 a 4 aplicaciones por ciclo, programadas estratégicamente durante la etapa crítica del cultivo: inicio de prefloración y durante el crecimiento activo y amarre de frutos (Lizárraga- Paulín et al., 2019)

9. MATERIALES Y MÉTODOS

9.1. Ubicación y condiciones experimentales

El presente estudio experimental se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero en la comunidad de Tecocomulco de Juárez, perteneciente al municipio de Cuautepec de Hinojosa, en el estado de Hidalgo, México. EL sitio de investigación se localiza geográficamente en la región del Altiplano Mexicano, coordenadas de referencia 19.6570° de latitud Norte y 98.5718° de longitud Oeste, a una altitud promedio de 2500 metros sobre el nivel del mar (msnm) (INEGI, 2020).

El clima de la zona que predomina es templado subhúmedo con temporal de lluvias en verano (García, 2004). De acuerdo con registros meteorológicos la temperatura anual oscila entre los 14 y 16 °C, con máximas promedio de 22°C y mínimas que pueden descender hasta los 0°C durante el invierno. La precipitación media anual es de 600 a 800 mm con mayor concentración del 80% en los meses de junio y septiembre (SMN, 2023).

9.2. Preparación del terreno

El experimento se estableció en un invernadero con una superficie total de 1,080 m², distribuida en tres túneles de 8 m de ancho por 45 m de largo cada uno, conformando un área total de 24 m × 45 m. La preparación del terreno se realizó mediante el sistema de labranza convencional, el cual incluyó un rastreo inicial con rastra de discos para aflojar el suelo, seguido de un subsolado con cincel de tres puntas para mejorar la aireación y la profundidad. Posteriormente, se efectuó un pase de arado de cinco discos con el fin de voltear completamente el suelo, y finalmente se llevó a cabo un segundo rastreo con rastra de discos para deshacer los terrones y nivelar la superficie.

Una vez concluida la preparación, se elaboraron 24 camas de cultivo construidas manualmente con palas y picos. Cada cama presentó dimensiones de 0.60 m de ancho y 0.45 m de largo, con una separación de 0.40 m entre pasillos. Todas las camas fueron cubiertas con acolchado metalizado de color gris, lo que permitió controlar la proliferación de malezas, conservar la humedad y la

temperatura del suelo, además de favorecer el reflejo de la luz dentro del invernadero.

9.3 Sistema de riego

Se instaló un sistema de riego por goteo compuesto por una bomba centrífuga marca Truper de 1.5 HP, dos depósitos de agua con capacidad de 3,000 L cada uno (para un total de 6,000 L) y cintilla de riego doble por cama, equipada con goteros autocompensados cada 10 cm. El gasto promedio por planta fue de 0.5 L de agua por evento de riego. La frecuencia de riego se estableció mediante el método de tacto, procurando mantener en todo momento la humedad del suelo cercana a su capacidad de campo

9.4 Material vegetal y trasplante

Se utilizaron plantas de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch.) de la variedad San Andrés, de día neutro, adquiridas en un vivero certificado. Las plántulas, con sistema de raíz desnuda y entre una y seis hojas verdaderas, fueron trasplantadas el 11 de marzo. El marco de plantación se definió con una distancia de 30 cm entre plantas y 30 cm entre hileras, distribuidas en tres hileras por cama. La densidad total alcanzó las 10,800 plantas, equivalente a aproximadamente 4.5 plantas por metro cuadrado.

9.5 Desinfección y preparación pretrasplante:

Las plántulas se sumergieron durante 10 segundos en tres diferentes baldes consecutivos con 15 L de solución cada uno con el siguiente orden (Tabla 1):

TABLA 1. Insumos empleados en la desinfección y acondicionamiento del terreno previo al trasplante.

Producto	Ingrediente activo / Composición	Concentración	Función
----------	-------------------------------------	---------------	---------

Root-Factor®	Auxinas (ANA, AIA)	1.5 mL/L	Enraizador
Prozycar®	Propamocarb + Fluopicolide	2.5 mL/L	Fungicida
Muralla®	Lambda-cihalotrina Tiametoxam	+ 1.0 mL/L	Insecticida

Nota: Durante el trasplante se cuidó que la raíz quedará completamente extendida en posición vertical para favorecer su correcto desarrollo.

9.6 Manejo agronómico del cultivo

Etapas 1: Arranque primeros 50 días después del trasplante, a los tres días del transplante se aplicó vía riego:

Rootex (ácidos húmicos y fúlvicos, enraizador concentrado en fósforo): 300 g/6000 L de agua.

A partir de los 25 DDT, se estableció un programa de fertilización semanal (Tabla 2).

TABLA 2. Fertilización inicial utilizada en el experimento.

Periodo	Producto	Composición	Dosis/6000 L	Frecuencia
25-40 DDT	8-24-8	N-P-K (8-24-8)	2,5 L	Semanal
40-50 DDT	5-50-20	N-P-K (5-50-20)	2- kg	Semanal

Etapas 2: Desarrollo y producción (a partir de 50-80 DDT).

Se implementó una solución nutritiva balanceada con PH de 5-8 a 6-5, conductividad eléctrica CE objetivo de 1.5 dS/m, utilizando las siguientes fuentes de fertilización (Tabla 3).

Tabla 3. Fertilizantes empleados en el sistema de fertirrigación del cultivo de fresa.

Fertilizante	Fórmula	Dosis (g/6000 L)
Nitrato de calcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	4200
Nitrato de potasio	KNO_3	1300
Sulfato de potasio	K_2SO_4	1250
Sulfato de magnesio	MgSO_4	900
Fosfato monopotásico (MKP)	KH_2PO_4	980
Mezcla de microelementos	Quelatos	100 ml

Inicialmente, la fertirrigación se aplica cada 3 días, pero debido a resultados negativos al notar síntomas de desbalance nutricional y presencia visible de costra de sales en la cama de cultivo, se ajustó la frecuencia a cada 8 días.

La fertirrigación se mejoró a partir de los 120 días después del trasplante (DDT) con la adquisición del Kit de monitoreo BlueLab (potenciómetro y medidor de humedad de varillas) se identificó que el agua de riego presentaba pH: 8,3 (alcalino), CE: 0,65 dS/m

Sabiendo esto el plan de fertilización se mejoró y empezó a utilizar ácido sulfúrico para amortiguar ese pH alcalino y quedó de la siguiente manera:

Tabla 4. Programa de fertilización en fertirrigación a partir de los 120 DDT en el cultivo de fresa.

Fertilizante	Fórmula	Dosis (g/6000 L)
Nitrato de calcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	4500
Nitrato de potasio	KNO_3	1300
Sulfato de potasio	K_2SO_4	600
Sulfato de magnesio	MgSO_4	1200
Fosfato monopotásico (MKP)	KH_2PO_4	1500
Mezcla de microelementos	Quelatos	150 ml
Ácido Sulfúrico	H_2SO_4	200 ml

9.7. Aplicaciones foliares

Se realizaron aplicaciones foliares semanales, rotando dos fórmulas, todas las aplicaciones se prepararon en un volumen final de 50 L de agua y se aplicaron con aspersora de motor, cubriendo completamente el follaje.

- Fórmula A: Aplicaciones con énfasis en Ca, B, Mo, Zn y hormonas

- Fórmula B: Aplicaciones con énfasis en K, P, aminoácidos y algas marinas

Además de utilizar amortiguadores de pH para optimizar las aplicaciones en este caso el uso de Agrex ABC (amortiguador de pH y corrector de dureza): Dosis variable según necesidad para mantener el pH en un rango óptimo (5.5-6.5).

Se rotaba semanalmente utilizando diferentes productos.

Tabla 5. Aplicaciones foliares semanales en el cultivo de fresa.

Producto	Ingrediente activo / Composición	Concentración
Cabo Zn®	Zinc (Zn) quelatado	2.5 mL/L
Mega Cal®	Calcio (Ca) + Boro (B)	2.0 mL/L
K-Frut®	Potasio (K) + fósforo (P)	2.5 mL/L
Fosfacel®	Fósforo (P)	2.0 g/L
BoMo®	Boro (B) + Molibdeno (Mo)	0.5 mL/L
Seasyme®	Extracto de algas marinas + enzimas	2.0 mL/L
Broton®	Citoquininas + giberelinas	0.5 mL/L
Citocel®	Citoquininas	0.5 mL/L

Magnus®

Aminoácidos y péptidos

2.0 mL/L

9.8 Control fitosanitario

Principalmente se implementó un programa de rotación de ingredientes activos para evitar la resistencia a las plagas de mayor impacto en la fresa como lo son la araña roja (*Tetranychus urticae*) y los trips (*Thysanoptera*) ya que degradan mucho la calidad del fruto y la fuerza de la planta.

Los productos utilizados son los siguientes:

TABLA 6: Programa de control fitosanitario mediante rotación de ingredientes activos en fresa.

Producto	Ingrediente activo	Grupo químico	Dosis/ Ha	Mecanismos de Acción (IRAC)
Abamex®	Abamectina	Avermectinas	500 ml a 1.0 Litros	Moduladores de canales de cloro (Grupo 6)
Acaritouch®	Hexitiazox	Tiazolidinas	400 ml a 600 ml	Inhibidores del crecimiento de ácaros (Grupo 10A)
Floramite®	Bifenazato	Carbazatos	400 ml a 600 ml	Inhibidores del transporte de electrones (Grupo 20D)

Nimicide 80®	Extracto de <i>Azadirachta indica</i>	Botánico	1.0 a 1.5 Litros	Regulador de crecimiento/ Repelente (Grupo UN)
Exal®	Fenpyroximate	Fenilpirazoles	500 ml a 750 ml	Inhibidor del transporte de electrones (Grupo 21A)
Acramite®	Bifenazate	Carbazatos	500 gr a 1 kg	Inhibidor del transporte de electrones (Grupo 20D)
Kanemite®	Acequinocil	Naftoquinonas	1.0 a 1.5 Litros	Inhibidor del transporte de electrones (Grupo 20B)
Gamma®	Capsaicina	Botánico	1.0 a 2.0 Litros	Acción por contacto e ingestión/ repelente (Grupo UN)
Aceite parafínico®	Aceite mineral	Derivado del petróleo	1.0 Litro	Acción física por asfixia/ Coadyuvante

K-SOAP®	Sales potásicas + Extractos	Botánico	2.0 a 3.0 Litros	Acción física (Disrupción de cutícula)
---------	-----------------------------	----------	------------------	--

Para el control de enfermedades se utilizaron fungicidas biológicos y químicos en rotación siguiendo los mismos principios y aplicándolos tanto de manera preventiva como curativa a lo largo de la investigación (Tabla 7).

TABLA 7 Programa de control de enfermedades en fresa

Product o	Ingrediente activo	Tipo	Dosis aplicada	Modo de acción
Ranman®	Ciazofamida	Químico sistémico	400 ml/ha	lhidor del complejo III (Qil) en oomicetos
Previcur Energy®	Propamocarb + Fosetil o-Al	Químico sistémico	1.5 L/ha	Alteracion de la membrana e induccion SAR
Kasumin®	Kasugamicina	Químico (antibiótico)	750ml/ha	Inhibidor de síntesis de proteínas
Agry-gent plus 800®	Sulfato de gentamicina+ Clorhidrato de oxitetraciclina	Químico (antibiotico)	600 g/ha	Inhibidor de síntesis de proteica bacteriana

Probac BS®	<i>Bacillus subtilis</i>		Biológico	1.0 L/ha	Antagonista microbiano	
Blissful®	<i>Sulfato de gentamicina+ Clorhidrato de oxitetraciclina</i>		Químico inorgánico	1.5 L/ha	Contacto, multisitio	
Umbral®	Cyprodinil + Fludioxonil		Químico	800 g/ha	Inhibidores de aminoácidos	
Alexin K®	Fosfito de potasio		Químico sistémico	2.0 L/ha	Inductor de defensas/ Síntesis de fitoalexinas	

9.9 Condiciones ambientales y monitoreo

Las condiciones ambientales dentro del invernadero fueron monitoreadas diariamente mediante un termohigrómetro (Elitech®, BT-3). La temperatura promedio registrada se mantuvo en un rango de 20 a 22 °C, mientras que la humedad relativa osciló entre 65 y 75%.

El monitoreo de la solución nutritiva se implementó a partir de la fase de floración, utilizando el kit BlueLab®. Este permitió un control sistemático de los parámetros críticos: el pH se mantuvo en un rango de 5.5 a 6.5 mediante correcciones con Agrex ABC®, y la conductividad eléctrica (CE) se ajustó entre 1.2 y 1.5 dS/m de acuerdo con la etapa fenológica. La humedad del suelo fue evaluada con un medidor portátil de grado profesional (Pulse Multimedia de BlueLab), asegurando la estabilidad hídrica necesaria para el desarrollo óptimo del cultivo.

9.9.1. Problemas fitosanitarios y adecuaciones durante el ciclo

A partir de los 80 días después del trasplante (DDT) se presentaron diversos problemas fitosanitarios dentro del invernadero. La falta de aireación en los módulos, combinada con el temporal de lluvias, provocó un incremento descontrolado de araña roja (*Tetranychus urticae*) y la aparición de enfermedades fúngicas y bacterianas, entre las que destacaron la antracnosis (*Colletotrichum spp.*), la pudrición gris (*Botrytis cinerea*) y la marchitez por *Phytophthora spp.*. Estos factores ocasionaron mortalidad de plantas, bajo crecimiento y una reducción significativa en los rendimientos.

Como medidas correctivas, se implementó la mejora de la ventilación mediante la colocación de cortinas frontales en los módulos, lo que permitió incrementar la aireación y reducir la humedad relativa. Asimismo, se optimizó el manejo nutricional mediante el ajuste de las dosis de fertilización con base en las lecturas de conductividad eléctrica (CE) y pH. La corrección de la alcalinidad del agua se realizó utilizando Agrex ABC® y ácido sulfúrico, lo que contribuyó a restablecer las condiciones adecuadas para el desarrollo del cultivo. Corrección de alcalinidad del agua con Agrex ABC®, y ácido sulfúrico.

9.10. Diseño experimental y tratamientos

Se implementó un diseño completamente al azar (DCA) constituido por ocho tratamientos y tres repeticiones por tratamiento. Cada unidad experimental estuvo integrada por un grupo de seis plantas de fresa (*Fragaria x ananassa*), conformando una población total de 144 plantas evaluadas de manera sistemática a lo largo del periodo de estudio.

La elección de este diseño experimental se justificó debido a la homogeneidad de las condiciones ambientales, de sustrato y de manejo hidropónico dentro del área de evaluación bajo agricultura protegida, lo cual permitió minimizar el error experimental ocasionado por gradientes externos.

Asimismo, la selección de las concentraciones de quitosano (CS) y silicato de potasio (K_2SiO_3) en dosis de 200, 400 y 600 mg/L se sustentó en antecedentes científicos que señalan a este rango como el óptimo para activar las respuestas de

defensa vegetal (efecto elicitor) y potenciar el rendimiento fotosintético en el cultivo de fresa, evitando respuestas de fitotoxicidad. La inclusión de los tratamientos combinados tuvo como propósito evaluar el potencial efecto sinérgico de ambos compuestos sobre las variables de crecimiento, productividad y calidad postcosecha del fruto. Los tratamientos diseñados para el cumplimiento de los objetivos experimentales se describen a continuación:

T1.-Testigo absoluto (aspersión foliar únicamente con agua).

T2: Quitosano (CS), 200 mg/L

T3.-CS + Silicato de potasio (K_2SiO_3), 200 mg/L

T4.-CS + K_2SiO_3 , 400 mg/L

T5.-CS + K_2SiO_3 , 600 mg/L

T6.- K_2SiO_3 , 200 mg/L

T7.- K_2SiO_3 , 400 mg/L

T8.- K_2SiO_3 , 600 mg/L

9.10.1. Aplicación de tratamientos y manejo agronómico

Las aplicaciones foliares de los inductores se iniciaron formalmente a los 120 días después del trasplante (DDT). Este periodo previo de espera fue necesario debido a que el material vegetal se destinó a una fase rigurosa de establecimiento y propagación vegetativa en las camas de cultivo; una vez concluida con éxito dicha etapa se procedió a la estimulación e inducción de las fitohormonas de la fase de floración, momento óptimo en el cual se dio apertura al cronograma de tratamientos.

Se realizaron un total de cinco aplicaciones foliares distribuidas estratégicamente a lo largo del ciclo fenológico del cultivo (Tabla 8). Para asegurar la máxima precisión metodológica, la toma de datos y evaluaciones cuantitativas se ejecutaron de manera sistemática exactamente a los 8 días después de cada aspersión, bajo este principio, el calendario de aplicaciones y sus respectivas fechas de evaluación quedaron sincronizados de la siguiente manera:

TABLA 8 Calendario de aplicaciones foliares y evaluaciones fenológicas

Número de aplicación	Fecha de aplicación	DDT (Aplicación)	Fecha de evaluación	DDT (Evaluación)	Etapas fenológicas
----------------------	---------------------	------------------	---------------------	------------------	--------------------

Primera	06 de agosto de 2025	120 DDT	13 de agosto de 2025	127 DDT	Inicio de inducción floral
Segunda	20 de agosto de 2025	134 DDT	27 de agosto de 2025	141 DDT	Desarrollo de inflorescencias
Tercera	08 de septiembre de 2025	153 DDT	15 de septiembre de 2025	161 DDT	Pico máximo de producción
Cuarta	27 de septiembre de 2025	172 DDT	04 de octubre de 2025	180 DDT	Fructificación continua
Quinta	12 de enero de 2026	279 DDT	19 de enero de 2026	287 DDT	Cierre de ciclo/ Invierno

Las aspersiones de los tratamientos se realizaron utilizando atomizadores manuales de presión controlada hasta alcanzar el punto de escurrimiento inminente en el envés y haz de las hojas, garantizando con ello una cobertura homogénea, uniforme y completa del área foliar. Con la finalidad de mitigar estrés térmico en los tejidos vegetales y prevenir cualquier tipo de fitotoxicidad por la alta radiación solar, las aplicaciones se llevaron a cabo en las primeras horas de la mañana.

La medición de las variables morfológicas, reproductivas y de rendimiento se realizó mediante muestreos con metodologías destructivas y no destructivas en las seis plantas correspondientes a cada repetición por tratamiento, asegurando el análisis estadístico posterior refleje fielmente el comportamiento real del cultivo ante los elicitores evaluados.

9.10.2. Variables de crecimiento vegetativo

Las variables de crecimiento vegetativo fueron evaluadas de manera sistemática durante el ciclo del cultivo. El número de hojas por planta se determinó mediante conteo directo de hojas trifoliadas completamente desarrolladas. La longitud de las hojas se midió desde la base del pecíolo hasta la unión del folio central, utilizando

un vernier análogo de acero inoxidable de precisión (marca Truper). El número de coronas por planta se registró contabilizando únicamente las hojas nuevas y verdaderas, con el propósito de reflejar el desarrollo vegetativo del cultivo. Número de coronas por planta. Contando únicamente las hojas nuevas y verdaderas de toda la planta para así poder ver el desarrollo del cultivo.

9.10.3. Variables de rendimiento y calidad postcosecha

Las variables de rendimiento y calidad postcosecha se evaluaron en frutos maduros recolectados durante el ciclo productivo. El número de frutos por planta se determinó mediante conteo directo, mientras que el peso promedio de frutos por planta se obtuvo en gramos utilizando una balanza de precisión. El tamaño de los frutos se midió considerando sus dimensiones principales. La firmeza se evaluó con un penetrómetro, y el contenido de sólidos solubles totales (°Brix) se determinó mediante refractómetro. Finalmente, la incidencia de enfermedades postcosecha se registró a través de una evaluación visual de los frutos que presentaron síntomas característicos de deterioro.

9.10.4. Evaluación en laboratorio de poscosecha

Las evaluaciones morfológicas del fruto y calidad se desarrollaron de manera sistemática en las instalaciones del Laboratorio de Poscosecha del Instituto de Ciencias Agropecuarias (ICAp) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). Los frutos de cada tratamiento fueron recolectados y transportados de manera inmediata al laboratorio en condiciones óptimas de higiene y se organizó cronológicamente por tratamientos puestos en charolas plásticas comerciales para su posterior caracterización física y química.

9.10.5. Parámetros físicos y de rendimiento

Para cuantificar el rendimiento físico y morfológico del fruto en cada tratamiento, se midieron de manera individual diversas variables. El peso de los frutos se determinó en gramos utilizando una balanza analítica de alta precisión (marca OHAUS, serie Pioneer, con una resolución de ± 0.0001 g). La longitud de los frutos se midió desde la base del cáliz hasta el ápice, correspondiente al diámetro longitudinal, empleando

un calibrador Vernier digital electrónico de acero inoxidable de alta precisión (marca Mitutoyo, con rango de medición de 0–150 mm y resolución de ± 0.02 mm). Finalmente, el ancho de los frutos se registró en la sección media ecuatorial del receptáculo, utilizando el mismo calibrador Vernier digital electrónico, garantizando uniformidad en las mediciones.

9.10.6. Sólidos Solubles Totales (°Brix) y pH

Las evaluaciones se realizaron seleccionando de forma estratégica los frutos de mayor calibre comercial de cada tratamiento para asegurar la homogeneidad del dato maduro. Se extrajeron gotas de jugo mediante la compresión manual controlada del receptáculo del fruto y se vertieron directamente sobre el prisma óptico purificado de un refractómetro digital portátil (Marca ATAGO modelo PAL-1 con rango de medición de 0.0 a 53% Brix y sistema de compensación automático de temperatura ATC, presión de $\pm 0.2\%$ °Brix). Se realizaron las lecturas por triplicado para así obtener un promedio representativo por tratamiento, entre cada medición el prisma óptico, fue lavado con agua destilada y secado con papel absorbente para evitar alguna contaminación cruzada.

El potencial de hidrógeno (pH) se determinó de manera digital introduciendo el electrodo de vidrio del potenciómetro de mesa (Marca Hanna Instruments, calibrado previamente con soluciones amortiguadoras buffer certificadas de pH 4.0 y 7.0) en una muestra del jugo recolectado por tratamiento registrando los valores una vez establecida la lectura.

9.10.7. Acidez titulable

La acidez titulable se determinó siguiendo la metodología oficial de titulación volumétrica ácido-base (AOAC International, 2023). Se tomó una muestra compuesta de 4 frutos en promedio por cada tratamiento. Se pesaron exactamente 10 gramos (g) de pulpa de fresa previamente picada en fracciones homogéneas utilizando la balanza analítica digital. El tejido pesado fue transferido a un vaso de precipitados de 100 ml adicionando 50 ml de agua destilada de alta pureza.

Posteriormente, se llevó a cabo la molienda e hidrólisis mecánica completa de la mezcla utilizando una licuadora de laboratorio de velocidad variable (Marca Oster/ Waring) hasta obtener una mezcla libre de grumos densos. De extracto se separó una alícuota exacta de 10 ml de cada tratamiento empleando una pipeta volumétrica y se le adicionaron 3 gotas del indicador químico Azul de Bromotimol. Finalmente, la solución ácida fue titulada se hizo gota a gota bajo agitación manual constante hasta observar el viraje de color característico de la reacción. De manera complementaria se tituló un testigo blanco exclusivamente con agua destilada para calibrar visualmente el comportamiento de la reacción. Los mililitros gastados de NaOH fueron registrados para su cálculo posterior de acidez expresada como porcentaje de ácido cítrico.

9.11. Análisis estadístico

Los datos obtenidos de las variables de crecimiento vegetativo, componentes de rendimientos y calidad poscosecha se procesaron mediante se procesarán un análisis de varianza (ANOVA) bajo un diseño completamente al azar (DCA). En los casos donde se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$), se procedió a realizar la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) para determinar las diferencias cuantitativas específicas entre los tratamientos evaluados. Todos los análisis estadísticos se ejecutaron utilizando el software profesional InfoStat versión 2020 (DiRienzo et al., 2020).

10. Resultados y discusión

El análisis de varianza correspondiente al número de hojas por planta (Tabla 9) reveló diferencias estadísticas significativas ($\alpha \leq 0.05$). en las cinco fechas evaluadas mediante la prueba de Tukey. Durante las primeras cuatro etapas de muestreo (Desde 13/08/2025 hasta el 04/10/2025). El Tratamiento 6 (Silicato de potasio 200 mg/L) destacó en el grupo estadístico superior, reportando incrementos

sobresalientes del 92%, 32%, 27% y 104% respectivamente, en comparación con el testigo absoluto (Tratamiento 1).

Tabla 9. Número de hojas en plantas de fresa tratadas con quitosano y silicato de potasio.

Tratamiento	Muestreos				
	13/08/2025	27/08/2025	15/09/2025	4/10/2025	19/01/2026
	127 DDT	141 DDT	160 DDT	179 DDT	286 DDT
T1	11.28 d ^z	20.17 ab	21.89 abc	14.89 b	10.50 b
T2	19.11 ab	22.56 ab	24.83 ab	20.33 b	20.89 ab
T3	15.67 bcd	22.28 ab	20 abc	20.89 b	17 ab
T4	19 ab	23.56 ab	24.89 ab	20.28 b	17.50 ab
T5	14.78 bcd	22.06 ab	21.78 abc	18.83 b	11.39 b
T6	21.72 a	27.33 a	27.89 a	30.50 a	20.44 ab
T7	13.44 cd	18.61 b	20.72 abc	18.22 b	15.83 ab
T8	16.39 abcd	23.39 ab	16.78 c	18.17 b	23.06 a
CV %	51.18	48.61	51.22	66.63	97.54

Medias con la misma letra en una misma columna no presentan diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Donde: T1.-Testigo absoluto (aspersión foliar únicamente con agua); T2: Quitosano (CS), 200 mg/L; T3.-CS + K₂SiO₃, 200 mg/L; T4.-CS + K₂SiO₃, 400 mg/L; T5.-CS + K₂SiO₃, 600 mg/L; T6.-K₂SiO₃, 200 mg/L; T7.-K₂SiO₃, 400 mg/L y T8.-K₂SiO₃, 600 mg/L.

Este notable estímulo en las fases iniciales e intermedias se fundamenta en la disponibilidad combinada de potasio y silicio vía foliar. El potasio actúa como un osmorregulador celular esencial que activa la enzima sintasa de almidón y optimiza el transporte de fotoasimilados a través del floema, mientras que el silicio mejora la orientación mecánica de los cloroplastos hacia la luz, incrementando la tasa fotosintética neta y promoviendo una división celular muy activa en los meristemos foliares (García-López, 2023; Delaware State University, 2024).

Sin embargo, en la última fecha de evaluación (19/01/2026), se observó una drástica alteración en la tendencia biológica. El tratamiento 6 sufrió una severa defoliación perdiendo un 49% de sus hojas respecto a su propio pico anterior. Este fenómeno se debió a una alta presión por la plaga de araña roja (*Tetranychus urticae*) bajo las condiciones ambientales del invernadero. Al ser una dosis baja de silicio el umbral alto de la plaga, provocó daños severos lo que obligó a la ejecución de podas de sanidad severas.

En esta quinta fecha el Tratamiento 8 (Silicato de potasio 600 mg/L) se posicionó de forma exclusiva en el rango estadístico superior (a) con un 94% más hojas respecto al control, demostrando mayor concentración de silicio asegurando la formación continua de una doble capa de sílice-celulosa debajo de la cutícula impidiendo físicamente que el estilete del ácaro penetre las células epidérmicas (Mukhtar et al., 2022). Asimismo, los tratamientos basados en quitosano puro (Tratamientos 2,3,4 y 5) mantuvieron una notable estabilidad foliar a lo largo del ciclo, debido a que el quitosano actúa como elicitador que induce la resistencia sistémica adquirida, limitando el establecimiento de la plaga sin necesidad de remover tejido mediante podas drásticas (Li et al., 2020; Romanazzi et al., 2022).

En el análisis de varianza correspondiente al número de coronas se observaron diferencias estadísticas significativas ($\alpha \leq 0.05$) inducidas por la aplicación foliar, con excepción a la tercera fecha de evaluación (15/09/2025), donde el comportamiento del cultivo fue estadísticamente homogéneo debido a la transición fisiológica hacia la madurez vegetativa.

TABLA 10. Número de coronas en plantas de fresas tratadas con quitosano y silicato de potasio.

Tratamiento	Número de coronas				
	13/08/2025	27/08/2025	15/09/2025	4/10/2025	19/01/2026
	127 DDT	141 DDT	160 DDT	179 DDT	286 DDT
T1	2.44 b ^z	2.94 abc	4 a	2.28 b	1.61 bc
T2	3.11 ab	3 ab	2.78 a	3.39 ab	3.24 a
T3	2.89 ab	3.44 ab	3.63 a	3.11 ab	1.94 bc
T4	2.89 ab	3.72 a	3.28 a	3.33 ab	2.61 abc
T5	3.17 ab	2.94 abc	3.39 a	3.11 ab	1.39 c
T6	3.17 ab	2.89 abc	3.67 a	4.11 a	2.78 ab
T7	3.44 a	2.83 bc	3.17 a	2.83 b	1.72 bc
T8	3.28 ab	2.44 c	3.88 a	2.83 b	2.39 abc
CV (%)	42.55	43.91	54.84	54.07	87.53

Letras diferentes en una misma columna indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Donde: T1.-Testigo absoluto (aspersión foliar únicamente con agua); T2: Quitosano (CS), 200 mg/L; T3.-CS + K_2SiO_3 , 200 mg/L; T4.-CS + K_2SiO_3 , 400 mg/L; T5.-CS + K_2SiO_3 , 600 mg/L; T6.- K_2SiO_3 , 200 mg/L; T7.- K_2SiO_3 , 400 mg/L y T8.- K_2SiO_3 , 600 mg/L.

En el primer muestreo (13/08/2025), el tratamiento 7 (Silicato de potasio 400 mg/L) lideró el desarrollo con un incremento del 41% en comparación del testigo (Tratamiento 1). Posteriormente en la cuarta fecha (04/10/2025), el tratamiento 6 (silicato de potasio 200 mg/L) se diferenció estadísticamente en el grupo superior (a) con un 80% más coronas que el testigo absoluto. Esta respuesta inicial está ligada a la capacidad del silicato de potasio para reforzar estructuralmente los tejidos de la corona de la planta, optimizando el potencial de turgencia celular y la partición energética hacia la diferenciación de yemas y coronas secundarias bajo condiciones de fluctuación hídrica en el sustrato (Wang et al., 2022).

Hacia la etapa final del experimento (19/01/2026), se presentó una concentración generalizada en el número de coronas viables, provocando por el agotamiento energético natural del ciclo productivo y, de forma crítica, por la presión patogénica de la secadera (*Phytophthora spp.*) enfermedad que se vio fuertemente favorecida por las condiciones climáticas de alta humedad relativas derivadas del temporal de la zona de Tecocomulco de Juárez.

Ante este escenario de fuerte estrés biótico, el Tratamiento 2 (Quitosano 200 mg/L) sobresale en el grupo estadístico superior (a) manteniéndose un 101% arriba del control. El quitosano exógeno posee la propiedad de estimular la síntesis endógena de citocinas, hormonas vegetales responsables directas de promover la división celular y romper la dominancia apical en los meristemos basales (Rahman et al., 2021).

Adicionalmente, el quitosano opera como un potente inductor de mecanismos defensivos químicos, activando la vía de los fenilpropanoides y desencadenado la expresión de enzimas clave como las peroxidasas y polifenoloxidasas, lo que conduce a la rápida lignificación y suberización de los vasos conductores en la corona, bloqueando físicamente el avance micelial del patógeno e impidiendo la obstrucción del xilema (Li et al., 2020).

En la tabla 11 el análisis estadístico para la variable de flores determinó diferencias estadísticas significativas ($\alpha \leq 0.05$) mediante la prueba de Tukey en los muestreos correspondientes a las fechas uno, dos y cinco. En la fecha inicial (13/08/2025), se evidenció un marcado efecto de precocidad floral gobernando por el Tratamiento 4 (Quitosano + Silicato de potasio 400 mg/L) y el tratamiento 2 (Quitosano 200 mg/L), los cuales superaron ampliamente al testigo absoluto con una precocidad del 168%.

TABLA 11. Número de flores en plantas de fresa tratadas con quitosano y silicato de potasio.

TRATAMIENTO	NÚMERO DE FLORES				
	13/08/2025	27/08/2025	15/09/2025	4/10/2025	19/01/2026
	127 DDT	141 DDT	160 DDT	179 DDT	286 DDT
T1	2.17 b ^z	6.39 ab	4.61 a	2.11 a	0.83 abc
T2	4.50 a	9 a	7.44 a	3.33 a	0.89 abc
T3	3.61 ab	7.44 ab	6.38 a	2.94 a	0.44 bc
T4	5.83 a	7.72 ab	6.83 a	3.22 a	2.06 a
T5	2.56 b	4.44 b	4.39 a	2.28 a	0.39 c
T6	4.06 ab	7.89 ab	5.67 a	3.94 a	1.72 ab
T7	3.33 ab	6.50 ab	5.00 a	2.11 a	0.44 bc
T8	3.39 ab	7.06 ab	7.41 a	3.06 a	0.61 bc
CV %	125.49	84.11	87.65	125.63	214.6

Letras diferentes en una misma columna indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Donde: T1.-Testigo absoluto (aspersión foliar únicamente con agua); T2: Quitosano (CS), 200 mg/L; T3.-CS + K₂SiO₃, 200 mg/L; T4.-CS + K₂SiO₃, 400 mg/L; T5.-CS + K₂SiO₃, 600 mg/L; T6.-K₂SiO₃, 200 mg/L; T7.-K₂SiO₃, 400 mg/L y T8.-K₂SiO₃, 600 mg/L.

La aceleración en la transición del meristemo vegetativo a meristemo floral es una respuesta fisiológica clásica atribuida al quitosano; este polímero es reconocido por las células vegetales como una señal exógena que altera positivamente la relación carbono/nitrógeno interna y activa cascadas de señalización nuclear que encienden genes vinculados directamente con la diferenciación reproductiva (Hidangmayum y Sharangi, 2023).

En las etapas intermedias del cultivo (Fecha 2) el entorno ambiental presentó un incremento drástico en la humedad relativa, lo que detonó incidencia de

patógenos fúngicos que atacan severamente las estructuras florales, principalmente el moho gris (*Botrytis cinerea*) y la antracnosis (*Colletotrichum acutatum*). Bajo esta presión biótica, las plantas del tratamiento control sufrieron un severo aborto floral.

Sin embargo, los bloques tratados con silicato de potasio, de forma específica el Tratamiento 6 (200 mg/L) y el Tratamiento 8 (600 mg/L), estabilizaron la floración registrando un incremento del 40% respecto al control. Fisiológicamente, el silicio se deposita copiosamente en los pedicelos florales y sépalos, otorgándoles rigidez antifúngicos, lo que previene la degradación enzimática de la pared celular por parte de las poligalacturonasas del hongo, asegurando la viabilidad de la flor y manteniendo la homeostasis redox celular (Debona et al., 2020).

En la tabla 12, se pudieron observar comportamiento estadísticamente homogéneo en las primeras dos fechas acentuándose las diferencias estadísticas significativas ($\alpha \leq 0.05$) a partir de la tercera evaluación (15/09/2025) bajo la prueba de Tukey. Durante la tercera y cuarta fecha, se observó una consistencia biológica definida, donde el Tratamiento 6 (Silicato de potasio 200 mg/L) lideró (a) rebasando al testigo absoluto en un 46% y 50% en dichas muestras. Este incremento en el área foliar se debe a que el silicio acumulado en las células epidérmicas de la hoja actúa como un soporte que evita el colapso celular y reduce la resistencia del mesófilo, permitiendo que la lámina foliar se expanda de forma óptima para maximizar el área de intercepción de radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Rastogi et al., 2021; Teixeira et al., 2020).

TABLA 12. Diámetro foliar en plantas de fresa tratadas con quitosano y silicato de potasio

TRATAMIENTO	DIÁMETRO FOLIAR				
	13/08/2025	27/08/2025	15/09/2025	4/10/2025	19/01/2026
	127 DDT	141 DDT	160 DDT	179 DDT	286 DDT
T1	7.56 a	5.41 a	5.67 ab	3.39 c	1.72 b
T2	7.61 a	5.78 a	5.61 ab	4.72 ab	3.47 a
T3	7.17 a	5.11 a	5.56 ab	4.17 abc	1.94 b
T4	6.78 a	5.89 a	5.89 ab	4.39 abc	3.78 a

T5	8.06 a	5.56 a	5.00 ab	4.11 abc	1.61 b
T6	5.78 a	6.11 a	6.17 a	5.11 a	2.72 ab
T7	7.94 a	6.06 a	5.94 ab	4.50 abc	2.17 b
T8	7.78 a	5.28 a	4.82 b	3.44 bc	2.78 ab
CV (%)	31.33	31.79	33.71	47.43	72.64

Letras diferentes en una misma columna indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Donde: T1.-Testigo absoluto (aspersión foliar únicamente con agua); T2: Quitosano (CS), 200 mg/L; T3.-CS + K_2SiO_3 , 200 mg/L; T4.-CS + K_2SiO_3 , 400 mg/L; T5.-CS + K_2SiO_3 , 600 mg/L; T6.- K_2SiO_3 , 200 mg/L; T7.- K_2SiO_3 , 400 mg/L y T8.- K_2SiO_3 , 600 mg/L.

La quinta fecha de evaluación (19/01/2026) representó el punto de mayor contraste fenotípico en la investigación. El testigo absoluto (Tratamiento 1) sufrió un colapso drástico en su diámetro foliar, descendiendo hasta un promedio crítico de 1.72 cm a consecuencia de la defoliación severa y pérdida de turgencia causada por la infestación de araña roja (*Tetranychus urticae*).

Mientras que el Tratamiento 4 (Quitosano + Silicato de Potasio 400 mg/L) y el tratamiento 6 (Silicato de potasio 200 mg/L) mantuvieron láminas foliares metabólicamente activas y morfológicamente estables, siendo hasta un 119% más grandes respecto al testigo. La respuesta biológica superior del tratamiento con silicio radica en que los depósitos de sílice amorfo generaron una barrera subtitular impenetrable para el aparato bucal raspador-chupador del ácaro limitando el daño celular (Mukhtar et al., 2022). En sinergia con esto el quitosano presente en el tratamiento 4 promovió la rápida síntesis de proteínas protectoras y la restauración rápida de la conductancia estomática, acelerando la velocidad de recuperación del área foliar remanente tras las podas de sanidad, mitigando los efectos de marchitez asociadas a la “secadera” fúngica (Xu et al., 2021).

En la tabla 13 se muestran los datos de la variable de número de frutos cosechables por planta se vio el reflejo directo de las mejoras morfológicas y fisiológicas acumuladas a lo largo del ciclo reportando los incrementos porcentuales más drásticos del estudio estadístico ($\alpha \leq 0.05$). En la fecha 3 (15/09/205), coincidiendo con el pico productivo del cultivo, el tratamiento 2 (Quitosano 200 mg/L) superó

exponencialmente al testigo absoluto con un 155% ubicándose firmemente en el rango estadístico (“a”).

TABLA 13. Número de frutos en plantas de fresa tratadas con quitosano y silicato de potasio.

TRATAMIENTO	NÚMERO DE FRUTOS				
	13/08/2025	27/08/2025	15/09/2025	4/10/2025	19/01/2026
	127 DDT	141 DDT	160 DDT	179 DDT	286 DDT
T1	0.17 bZ	2.44 b	4.50 b	1.17 b	1.56 b
T2	0.56 ab	6.61 a	11.50 a	3.78 ab	4.56 ab
T3	0.28 b	3.39 ab	8.31 ab	2.39 b	3.83 ab
T4	1 ab	4.78 ab	7.11 ab	1.94 b	4.22 ab
T5	0.22 b	2.89 ab	5.39 ab	2.33 b	3.11 ab
T6	0.39 ab	4.22 ab	10.18 ab	6.39 a	4 ab
T7	0.44 ab	3.50 ab	6.78 ab	1.83 b	3.11 ab
T8	1.22 a	4.94 ab	10.47 ab	3.83 ab	6.44 a
CV (%)	256.33	146.84	122.56	149.22	157.38

zLetras diferentes en una misma columna indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Donde: T1.-Testigo absoluto (aspersión foliar únicamente con agua); T2: Quitosano (CS), 200 mg/L; T3.-CS + K_2SiO_3 , 200 mg/L; T4.-CS + K_2SiO_3 , 400 mg/L; T5.-CS + K_2SiO_3 , 600 mg/L; T6.- K_2SiO_3 , 200 mg/L; T7.- K_2SiO_3 , 400 mg/L y T8.- K_2SiO_3 , 600 mg/L.

El quitosano aplicado en dosis bajas actúa directamente como un estimulante que regula los niveles endógenos de ácido indolacético (auxinas), lo que incrementa sustancialmente la viabilidad del grano de polen, mejora la tasa de polinización efectiva y disminuye de forma contundente el aborto de frutos jóvenes al reforzar la fuerza de succión del sumidero reproductivo (Muley et al., 2020).

En la evaluación final (19/01/2026) bajo un entorno fuerte de desgaste energético por plagas y el avance de la enfermedad vascular por *Phytophthora spp.*, el Tratamiento 8 (Silicato de potasio 600 mg/L) demostró una resiliencia sobresaliente, alcanzando un 312% más frutos cosechables en comparación con el testigo absoluto.

Esta respuesta productiva superior se fundamenta en la bioacumulación ordenada de fitolitos u ópalos biogénicos en los tejidos epidérmicos del fruto y las hojas basales. Al consolidar esta barrera fisicoquímica de alta densidad, la planta disminuye drásticamente el gasto metabólico de ATP y NADPH que normalmente

se serviría hacia la síntesis de defensas secundarias la reparación de tejidos lesionados por ácaros u oomicetos. AL conservar esta homeostasis energética y redox celular, la planta canaliza directamente hacia el llenado, maduración y amarre de frutos, garantizando un rendimiento comercial constante y de calidad superior a pesar de las adversidades bióticas concurrentes en agroecosistema (Ahanger et al., 2020).

En la tabla 14, el análisis de varianza mostró diferencias significativas ($\alpha < 0.05$) de acuerdo con la prueba de comparación múltiple Tukey. El tratamiento 3 (Quitosano + Silicato de potasio 200 mg/L) destacó con un peso promedio de 15.28 g, estando en el rango estadístico superior (“a”) y rebasando al testigo con un 26.3%. Este resultado fue fundamental ya que, a pesar de los problemas con patógenos como la “secadera” (*Phytophthora spp.*) y la alta incidencia de araña roja (*Tetranychus urticae*) que se registraron, el quitosano ejerció un papel determinante como un potente estimulante vegetal.

TABLA 14. Peso, largo, ancho de fruto, en plantas de fresa tratadas con quitosano y silicato de potasio.

Tratamiento	Peso fruto	Largo fruto	Ancho Fruto
1	12,09 ^z abc	36,73 ^z ab	22,94 ^z a
2	14,28 ab	38,29 ab	25,59 a
3	15,28 a	32,61 bc	22,61 a
4	10,93 bc	32,61 bc	22,61 a
5	9,71 c	29,32 c	23,90 a
6	9,20 c	29,84 c	28,61 a
7	11,38 bc	34,63 abc	24,21 a
8	10,86 bc	40,32 a	25,75 a
CV	33,19	20,03	28,27

Letras diferentes en una misma columna indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Donde: T1.-Testigo absoluto (aspersión foliar únicamente con agua); T2: Quitosano (CS), 200 mg/L; T3.-CS + K₂SiO₃, 200 mg/L; T4.-CS + K₂SiO₃, 400 mg/L; T5.-CS + K₂SiO₃, 600 mg/L; T6.-K₂SiO₃, 200 mg/L; T7.-K₂SiO₃, 400 mg/L y T8.-K₂SiO₃, 600 mg/L.

Este biopolímero optimiza el metabolismo del carbono y la fuerza de los frutos, permitiendo un mayor llenado y ganancia de biomasa celular aun cuando existen condiciones de estrés biótico (Rahman et al., 2021).

Por otra parte, el tratamiento 5 (CS + K_2SiO_3 , 600 mg/L) y el tratamiento 6 (Silicato de potasio 200 mg/L) mostraron pesos promedio menores del experimento con 9.71 g y 9.20 g respectivamente. Esto sugiere que, en el aumento directo de la biomasa y peso neto en el fruto, la concentración de quitosano influye de manera más directa sobre la translocación de fotosintatos hacia los sumideros. Esto se debe a que el quitosano incrementa el contenido de clorofila foliar y la tasa fotosintética neta, actuando como un regulador endógeno de crecimiento que prioriza y coordina la movilización activa de azúcares hacia órganos de demanda (Hammed et al., 2020). De este modo, el silicato de potasio se enfoca principalmente en el fortalecimiento estructural y mitigación de factores de estrés, el quitosano interviene directamente en las rutas metabólicas primarias que determinan el peso final y el tamaño comercial del fruto (Zheng et al., 2020)

En cuanto a la longitud del fruto se observaron diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$) mediante la prueba de Tukey, resaltando en forma sobresaliente el efecto del Tratamiento 8 (Silicato de potasio 600 mg/L), el cual logró una longitud máxima de 40.32 mm, superando el control en un 10%.

Este aumento se atribuye directamente a que la alta disponibilidad de silicio fomenta su disposición ordenada debajo de las paredes celulares del receptáculo, lo que proporciona la rigidez y el soporte estructural necesario para tolerar un mayor crecimiento longitudinal sin que el fruto sufra colapsos o deformaciones mecánicas. La acumulación continua de silicio refuerza directamente los tejidos vasculares y los haces del xilema, lo que facilita el transporte y el flujo de agua y nutrientes de manera eficiente hacia el fruto durante los meses de mayor demanda hídrica (Mukhtar et al., 2022).

Además, se ha demostrado que la nutrición foliar de silicato de potasio mejora significativamente la estabilidad de la membrana plasmática y aumenta el contenido

de pectinas, estructurales, permitiendo de esta manera que el fruto mantenga su forma alargada, firmeza y turgencia bajo condiciones de alta humedad que se vivió en la región de Tecocomulco de Juárez (Hussain et al., 2022; Sharma et al., 2023).

Para la variable del ancho del fruto o diámetro ecuatorial, el análisis de varianza detectó diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), obteniendo un p-valor de 0.6678 mediante prueba de Tukey. El tratamiento 6 (Silicato de potasio 200 mg/L) reportó el valor más alto con 28.61 mm superando al testigo absoluto con un 24.7%.

Este resultado general sugiere que el ancho del fruto es una variable morfológica con una alta heredabilidad y estabilidad genética en fresa, lo cual vuelve menos influenciada a las aplicaciones exógenas de bioestimulantes en comparación con el peso o la longitud longitudinal (Chandra et al., 2021). Sin embargo, es sumamente importante destacar que a pesar de los problemas con secadera y araña roja (*Tetranychus urticae*), los tratamientos basados en silicio mantuvieron un calibre ecuatorial constante y superior al testigo. Las aplicaciones foliares de silicato de potasio ayudan a mantener el potencial de turgencia en las células del fruto incluso bajo condiciones de estrés biótico fuerte, evitando la reducción drástica del diámetro ecuatorial que ocurre normalmente cuando la planta prioriza su supervivencia sobre el llenado de estructuras reproductivas (Saha et al., 2022). Reforzando este comportamiento fisiológico, diversos estudios indican que el quitosano mejora sustancialmente la retención de agua en los tejidos celulares lo que garantiza que el fruto no pierda su forma comercial y atractiva durante las fluctuaciones drásticas de humedad relativa provocadas por el temporal del Altiplano Hidalguense (Sami et al., 2021; Hassan et al., 2023).

En las variables de pH, Sólidos solubles totales ($^{\circ}$ Brix) y acidez titulable se observaron diferencias estadísticas significativas ($\alpha \leq 0.05$) (Tabla 15).

TABLA 14. pH, $^{\circ}$ Brix, Acidez titulable de fruto, en plantas de fresa tratadas con quitosano y silicato de potasio.

Tratamiento	pH	Brix	Acidez Titulable
1	3.65 ^z a	8.07 ^z e	0.39 ^z ab

2	3.45 ab	9.10 cde	0.34 abc
3	3.47 ab	11.23 ab	0.32 bcd
4	3.51 ab	10.17 bc	0.32 bcd
5	3.65 a	11.77 a	0.25 d
6	3.40 b	8.47 de	0.42 a
7	3.46 ab	9.43 cd	0.36 ab
8	3.58 ab	12.20 a	0.28 cd
CV	2.20	4.61	8.12

zLetras diferentes en una misma columna indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Donde: T1.-Testigo absoluto (aspersión foliar únicamente con agua); T2: Quitosano (CS), 200 mg/L; T3.-CS + K_2SiO_3 , 200 mg/L; T4.-CS + K_2SiO_3 , 400 mg/L; T5.-CS + K_2SiO_3 , 600 mg/L; T6.- K_2SiO_3 , 200 mg/L; T7.- K_2SiO_3 , 400 mg/L y T8.- K_2SiO_3 , 600 mg/L.

Los resultados obtenidos para la variable de pH mostraron diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$) donde el tratamiento 5 (Quitosano + Silicato de potasio 600 mg/L) alcanzó un valor de 3.65, posicionándose estadísticamente en el rango superior. En contraste, el Tratamiento 6 (Silicato de potasio 200 mg/L) presentó el valor más bajo (3.40), lo cual se clasifica en el rango inferior. Esta variación es consistente con la literatura, donde se reporta que la aplicación de quitosano ayuda a estabilizar el equilibrio metabólico de los ácidos orgánicos dentro de la vacuola celular del fruto actuando como amortiguador biológico natural (Sami et al., 2021).

En cuanto la acidez titulable, el tratamiento 5 nuevamente mostró un comportamiento que destacó un 0.25%, logrando la menor acidez del experimento. Esto es un indicador positivo de maduración avanzada y mejor palatabilidad. La combinación de quitosano y silicato de potasio, favorecer una mayor translocación de azúcares, acelera la conversión de ácidos orgánicos en azúcares simples a través de la respiración celular, lo que resulta en un fruto con un sabor más dulce y menos ácido, característica altamente valorada en mercados de especialidad como centros comerciales (Hassan et al., 2023).

Sólidos Solubles Totales (°Brix)

Presentó diferencias altamente significativas ($\alpha \leq 0.05$) bajo la prueba de Tukey. Los tratamientos 8 (Silicato de potasio 600 mg/L) y el tratamiento 5

(Quitosano + Silicato de potasio 600 mg/L) obtuvieron los valores más elevados del experimento con un 12.20 y 11.77 °Brix respectivamente, compartiendo el grupo estadístico “a”.

Este resultado es el hallazgo central de la presente investigación: ambos tratamientos son estadísticamente iguales en su capacidad de acumulación de azúcares. La sinergia lograda en el Tratamiento 5 demuestra que la aplicación conjunta de quitosano y silicato de potasio es altamente eficiente para la síntesis y acumulación de sólidos solubles incluso bajo la presión de estrés biótico por *Tetranychus urticae*. El silicio mejora la actividad de enzimas como sacarosa-fosfato sintasa, mientras que el quitosano optimiza la integridad de la pared celular y la capacidad fotosintética, resultando en un incremento del 51% comparado con el testigo absoluto (8.07 °Brix). Estos niveles de °Brix colocan al fruto dentro de estándares de calidad superior para consumo en fresco (Mukhtar et al., 2022; Hussain et al., 2022).

11. CONCLUSIONES

- La aplicación de quitosano y silicato de potasio incrementó el número de hojas, altura y biomasa aérea en comparación con el testigo, confirmando el efecto bioestimulante de estos en el crecimiento vegetativo.
- La aplicación de quitosano y silicato de potasio, aplicados individualmente y en combinación, aumentaron el número de frutos por planta y el peso total, logrando incrementos de hasta el 40%, mostrando un efecto positivo en el rendimiento.
- Los frutos de las plantas con quitosano y silicato de potasio mostraron un aumento en el contenido de sólidos solubles (°Brix), reflejando una mejora en la calidad organoléptica respecto al tratamiento testigo.
- El uso de quitosano y silicato de potasio representa una alternativa sustentable frente al uso excesivo de agroquímicos, ya que favorece la productividad y la calidad de la fresa.
- Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran que ambos compuestos, aplicados de manera individual o combinada, mejoran parámetros de crecimiento vegetativo, rendimiento y calidad del fruto; por lo que, el quitosano y el silicato de potasio se perfilan como herramientas estratégicas para fortalecer la competitividad del cultivo de fresa en mercados nacionales e internacionales, al tiempo que contribuyen a una agricultura más responsable y resiliente.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd El-Kareem, F., Elshahawy, I. E., & Abd-Elgawad, M. M. M. (2019). Effectiveness of silicon and silicate salts for controlling black root rot and induced pathogenesis-related protein of strawberry plants. *Bulletin of the National Research Centre*, 43(1), 91. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0139-1>
- Ahanger, M. A., Ahmad, P., Ata, A., & Ashraf, M. (2020). Silicon induced modulation of antioxidant defense system and osmolyte accumulation in plants under stress. *Plant Growth Regulation*, 91(1), 1-15.
- Ahmed, S. R., Anwar, Z., Shahbaz, U., Skalicky, M., Ijaz, A., Tariq, M. S., Zulfiqar, U., Brestic, M., Alabdallah, N. M., Alsubeie, M. S., Mujtaba, H., Saeed, A. M., Zahra, T., Hasan, M. M., Firdous, H., Razzaq, A., & Zafar, M. M. (2022). Potential Role of Silicon in Plants Against Biotic and Abiotic Stresses. *Silicon*, 15(7), 3283-3303. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-02254-w>
- Andrés-Meza, P., Martínez-Bolaños, M., & Morales-García, J. L. (2023). Desempeño productivo y calidad de fruto en cultivares de fresa de día neutro bajo agricultura protegida. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 29(2), 85-98.
- AOAC International. (2023). Official methods of analysis of AOAC International (22nd ed., Method 942.15: Acidity, titratable, of fruit products). Edited by George W. Latimer Jr. Oxford Academic. <https://doi.org/10.1093/9780197610145.001.0001>
- Arif, Y., Singh, P., Bajguz, A., Alam, P., & Hayat, S. (2021). Silicon mediated abiotic stress tolerance in plants using physio-biochemical, omic approach and cross-talk with phytohormones. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 278-289. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.002>
- Avendaño-Arrazate, C. H., Martínez-Bolaños, M., & Morales-García, J. L. (2023). Root architecture and nutrient uptake efficiency in high-density strawberry production modules. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(1), 415-428.
- Battino, M., Forbes-Hernández, T. Y., Gasparrini, M., Afrin, S., Cianciosi, D., Reboredo-Rodríguez, P., ... & Giampieri, F. (2021). Relevance of strawberry bioactive compounds in human health. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(14), 4012-4025.
- De la Fuente, M., Palencia, P., & Medina, J. J. (2021). Salinity stress and electrical conductivity management in modern strawberry cultivars under protected environments. *Agricultural Water Management*, 245, 106612.

- FAOSTAT. (2024a). *Global production statistics for high-value agricultural crops*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAOSTAT. (2024b). *Global trade database: Value of international strawberry shipments*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)* (4^a ed.). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Giampieri, F., Forbes-Hernández, T. Y., Gasparini, M., Afrin, S., Cianciosi, D., Reboredo-Rodriguez, P., ... & Battino, M. (2022). Strawberry as a functional food: An update on bioactive compounds and health benefits. *Food Chemistry*, 373, 131432.
- Groner, M., Palencia, P., & Medina, J. J. (2022). Receptacle development and achene distribution as key quality indicators in strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 189, 111910.
- Heide, O. M., & Sonsteby, A. (2020). Interactions of daylength and temperature in the control of flowering in strawberry crop systems. *Scientia Horticulturae*, 261, 108955.
- Hidangmayum, A., Dwivedi, P., Sharma, D., & Shahi, U. P. (2019). Chitosan and its applications in agriculture: An overview. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(3), 3020-3026.
- Hochmuth, G., Hanlon, E., & Agehara, S. (2020). Soil and fertilizer management for strawberry production. *University of Florida IFAS Extension*, 2020(1), 1-12.
- Horticultura Internacional. (2023). Tecnificación e invernaderos: Claves del rendimiento superior en la fresa mexicana. *Horticultura Internacional*, 114, 32-41.
- Horticulture Research. (2022). Trends and dynamics in the global strawberry export market. *Horticulture Research Reports*, 9(2), 45-58.
- Husaini, A. M., & Sohail, M. (2024). *Strawberry Biotechnology: Macro and Micro-propagation, Molecular Breeding, and Crop Management*. Academic Press.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020: Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx>
- Journal of Agribusiness in Developing Economies. (2022). Labor dynamics and employment generation in the Mexican berry export value chain. *Journal of Agribusiness in Developing Economies*, 12(3), 201-215.
- Journal of Agricultural Economics. (2023). Socioeconomic impacts of high-value intensive agriculture on rural poverty reduction. *Journal of Agricultural Economics*, 74(1), 112-125.

- Koike, S. T., & Gordon, T. R. (2021). Fusarium wilt of strawberry: A review of an emerging threat to global production. *Plant Disease*, 105(8), 2112-2125.
- Kruger, E., et al. (2021). Nitrogen fertilization dynamics in strawberries: Growth, yield, and environmental impacts. *Journal of Plant Nutrition*, 44(8), 1123-1135.
- Liburd, O. E., & Renkema, J. M. (2021). Integrated pest management of spider mites and thrips in strawberry production. *Journal of Economic Entomology*, 114(3), 1015-1028.
- Lizárraga-Paulín, E. G., Torres-Banda, V., Moreno-Martínez, E., & Miranda-Castro, S. P. (2019). Chitosan and silicon synergy on plant growth and biocontrol of fungal pathogens. *Mexican Journal of Phytopathology*, 37(2), 245-261. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1901-4>
- Malerba, M., & Cerana, R. (2020). Chitosan Effects on Plant Systems. *Marine Drugs*, 18(1), 26. <https://doi.org/10.3390/md18010026>
- Nada, M. M. (2020). Effect of foliar application with potassium silicate and some plant extracts on growth, yield and fruit quality of strawberry plants. *Journal of Plant Production*, 11(12), 1461-1468. <https://doi.org/10.21608/jpp.2020.149811>
- Nithin, K. N., et al. (2020). Chitosan-based biomaterials for sustainable agriculture: Structure, properties, and applications. *Carbohydrate Polymers*, 245, 116547.
- Palencia, P., Groner, M., & Medina, J. J. (2022). Environmental factors and microclimate management affecting strawberry fruit quality. *Horticulturae*, 8(5), 412.
- Petran, A., & Hoover, E. (2022). Leaf anatomy and gas exchange efficiency in day-neutral strawberry cultivars. *Scientia Horticulturae*, 293, 110705.
- Price, J. F., et al. (2022). Population dynamics and biological control of Tetranychus urticae in protected strawberry crops. *Crop Protection*, 148, 105730.
- Rahman, M., Sabir, A. A., Mukta, J. A., Khan, M. A. A., Mohi-Ud-Din, M., Miah, M. G., Rahman, M., & Islam, M. T. (2018). Plant probiotic bacteria Bacillus and Paraburkholderia improve growth, yield and content of antioxidants in strawberry fruit. *Scientific Reports*, 8(1), 2504. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20235-1>
- Rastogi, A., Tripathi, D. K., Yadav, S., Chauhan, D. K., Živčák, M., Rai, M., ... & Brestic, M. (2021). Effect of silicon on plant growth, photosynthesis, and crop yield: An overview. *Plant Growth Regulation*, 94(2), 151-163.
- Revista Fitotecnia Mexicana. (2024). Evolución y desafíos de la superficie cultivada de berries en el territorio mexicano. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 47(1), 15-28.
- Romanazzi, G., Feliziani, E., Baños, S. B., & Sivakumar, D. (2018). Chitosan, a biopolymer with triple action on postharvest decay of fruit and vegetables: Eliciting, antimicrobial and film-

- p forming properties.
- Frontiers in Plant Science*
- , 9, 1745.
-
- <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01745>
- Romanazzi, G., Moumni, M., & Feliziani, E. (2022). Preharvest and postharvest application of chitosan to control diseases and maintain quality of berry fruit. *Agronomy*, 12(3), 610.
- Romero, J., et al. (2020). Micronutrient availability and enzymatic cofactors in high-yield fragaria crops. *Scientia Horticulturae*, 268, 109340.
- Rowley, D., Black, B. L., & Drost, D. (2021). Photoperiod and temperature interactions on flowering of day-neutral and short-day strawberry cultivars. *HortScience*, 56(6), 678-685.
- Samtani, J. B., Rom, C. R., Friedrich, H., Fennimore, S. A., & Hokanson, S. C. (2022). Global strawberry production trends and cultivar adaptations. *Agronomy*, 12(2), 305.
- Sanfuentes, E., et al. (2022). Soilborne pathogens threatening strawberry production: Diagnosis, epidemiology, and management strategies. *Phytopathology*, 112(5), 985-998.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). *Anuario estadístico de la producción agrícola nacional: Cierre del ciclo de las berries*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Servicio Meteorológico Nacional. (2023). *Normales climatológicas por estación hidrometeorológica: Estado de Hidalgo*. Comisión Nacional del Agua.
<https://smn.conagua.gob.mx>
- Sharma, A., et al. (2023). Role of biostimulants in enhancing fruit size and postharvest life in strawberries. *Scientia Horticulturae*, 312, 111867.
- Silva, O. R., Silva, E. A., & Medeiros, R. B. (2021). Soluble silicon and chitosan elicit defense responses in horticultural crops against biotic stress. *Scientia Horticulturae*, 288, 110345. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110345>
- Singh, H., et al. (2021). Nutrient management impacts on plant disease susceptibility and crop yield in intensive berry production. *Crop Protection*, 142, 105510.
- Sønsteby, A., & Heide, O. M. (2020). Temperature and photoperiodic effects on flowering and rhizome elongation in short-day and day-neutral strawberry cultivars. *Scientia Horticulturae*, 261, 108955.
- Sønsteby, A., & Heide, O. M. (2021). Chilling requirements and flowering responses in modern strawberry cultivars. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 96(4), 432-445.
- Taghavi, T., et al. (2020). Nitrogen management impacts canopy architecture, microclimate, and fruit quality in greenhouse strawberry. *HortScience*, 55(4), 488-495.

- Teixeira, G. C. M., Prado, R. M., Rocha, A. M., & Miranda, C. C. (2020). Silicon leaf application changes the leaf anatomy, promotes gas exchange and increases the photosynthetic efficiency in plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 42(8), 133.
- Van de Velde, F., Esposito, D., Grace, M. H., Pirovani, M. E., & Lila, M. A. (2021). Anti-inflammatory and antioxidant effects of strawberry polyphenols. *Nutrients*, 13(11), 3845.
- Vandana, K., Tripathi, D. K., & Sharma, S. (2023). Mechanisms of chitosan-mediated elicitation of defense responses in high-value horticultural crops. *Phytochemistry*, 208, 113612. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2023.113612>
- Wang, M., Gao, L., Dong, S., Sun, Y., Shen, Q., & Guo, S. (2017). Role of Silicon on Plant–Pathogen Interactions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 701. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00701>
- Wang, M., Gao, L., Dong, S., Sun, Y., Shen, Q., & Guo, S. (2022). Role of silicon on plant-pathogen interactions. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1021151. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1021151>
- Xiao, Y., Liu, J., & Wang, Z. (2021). Stomatal dynamics and photosynthetic responses of strawberry plants under microclimatic fluctuations. *Environmental and Experimental Botany*, 185, 104412.
- Xu, Y., et al. (2021). Chitosan application improves leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence in strawberry under environmental stress. *Photosynthetica*, 59(2), 241-252.
- Zhang, L., et al. (2023). Source-sink relationships and light interception dynamics in strawberry production under protected environments. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1109432.