



**UNIVERSIDAD MICHUACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE CIENCIAS
AGROPECUARIAS**



MAESTRÍA INTERINSTITUCIONAL EN AGRICULTURA PROTEGIDA

**VÍA DE APLICACIÓN Y DOSIS DE SILICIO EN LA
PRODUCCIÓN DE PEPINO CULTIVADO EN TEZONTLE**

TESIS
QUE PRESENTA

ROGELIO NUÑEZ AMBRIZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO DE:

MAESTRO EN AGRICULTURA PROTEGIDA

DIRECTOR DE TESIS
DR. PATRCIO APÁEZ BARRIOS

Apatzingán, Michoacán, México. Septiembre 2025



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

VÍA DE APLICACIÓN Y DOSIS DE SILICIO EN LA PRODUCCIÓN DE PEPINO
CULTIVADO EN TEZONTLE

TESIS QUE PRESENTA
ROGELIO NUÑEZ AMBRIZ

Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y aprobada como
requisito parcial, para obtener el grado de:

MAESTRO EN AGRICULTURA PROTEGIDA

COMITÉ PARTICULAR

Director

Dr. Patricio Apáez Barrios

Asesor

Dr. Noé Armando Ávila Ramírez

Asesor

Dr. Abimael López López

Apatzingán, Michoacán, México. Septiembre 2025

DEDICATORIAS

Este trabajo se lo dedico con mucho cariño a mis padres:

María Luisa Ambriz Arriola y Ezequiel Núñez Ramírez

Y a mis hermanos:

Maricarmen, Osvaldo, Andres y Neri

Ustedes siempre confiaron en mí y me han hecho un hombre de bien. Son mi más grande motivación; los quiero y los querré siempre.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por las facilidades otorgadas en cuanto a infraestructura, materiales y equipos necesarios para desarrollar esta investigación.

Le agradezco ampliamente a la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)**, por la beca otorgada que hizo posible culminar esta etapa académica en mi proyecto de vida.

Al Dr. Patricio Apáez Barrios, le agradezco por compartir conmigo sus conocimientos, sobre todo por su disponibilidad de tiempo y el gran apoyo brindado en todas las fases de esta investigación.

A mis asesores, **Dr. José Luis Escamilla García, Dr. Noé Armando Ávila Ramírez y Dr. Abimael López López**, les agradezco su tiempo, el conocimiento compartido, así como sus acertadas sugerencias en la revisión de este trabajo.

A todos los profesores que fueron pieza fundamental en mi formación académica en esta etapa de maestría.

A mi colega, **Ing. José Eduardo Cerda Torres** por apoyarme en las actividades de campo durante el desarrollo de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
Hipótesis.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
Origen e importancia del cultivo de pepino.....	4
Condiciones agroclimáticas del cultivo de pepino.....	4
Temperatura.....	4
Humedad relativa.....	5
Luminosidad.....	5
Concentración de dióxido de carbono.....	5
Producción de pepino bajo cubierta en México.....	6
Producción de pepino bajo cubierta en el estado de Michoacán.....	6
Agricultura protegida.....	7
Importancia y beneficios.....	7
Cultivos sin suelo.....	8
Producción de cultivos en sustratos.....	8
Importancia y beneficios.....	9
Características de los sustratos.....	10
Soluciones nutritivas.....	12
Elementos benéficos.....	13
Silicio.....	13
Absorción y transporte del silicio vía raíz.....	13
Absorción foliar del silicio.....	14
Efectos benéficos del silicio en las plantas.....	15
Tolerancia a altas temperaturas y estrés por sequía.....	15
Resistencia a plagas y enfermedades.....	16
Interacción con macronutrientes.....	17
Resistencia a toxicidad por metales pesados.....	18

Eficiencia de la fotosíntesis.....	20
Antecedentes de la aplicación de silicio en el cultivo de pepino.....	21
MATERIALES Y MÉTODOS	23
Descripción del área de estudio.....	23
Localización del área experimental.....	23
Metodología.....	23
Material vegetal.....	23
Sustrato.....	23
Establecimiento de contenedores.....	24
Instalación del sistema de riego.....	24
Desinfección de la casa sombra.....	24
Producción de plántulas.....	25
Trasplante.....	26
Riegos.....	26
Nutrición.....	27
Tutorado.....	28
Podas.....	28
Protección fitosanitaria.....	29
Cosecha.....	29
Registro de los elementos del clima y la fenología.....	29
Tratamientos y diseño experimental.....	30
Variables morfológicas.....	32
Variables fisiológicas.....	32
Variables de rendimiento y de calidad de los frutos.....	33
Análisis estadístico.....	34
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
Fenología y elementos del clima.....	35
Variables morfológicas.....	36
Longitud del tallo.....	36
Diámetro del tallo.....	38
Número de hojas por planta.....	41
Variables fisiológicas.....	43
Área foliar por planta.....	43
Clorofila en las hojas.....	44
Acumulación de materia seca.....	46
Concentración de macronutrientes en las hojas.....	48

Concentración de micronutrientos en las hojas.....	49
Variables de rendimiento y calidad de frutos.....	51
Rendimiento y sus componentes.....	51
Calidad de los frutos.....	54
Análisis de correlación de Pearson.....	56
CONCLUSIONES.....	58
LITERATURA CITADA.....	59
ANEXOS.....	77
Anexo 1. Elementos del clima.....	77
Anexo 2. Análisis de agua.....	80
Anexo 3. Formulación de la solución nutritiva.....	80

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro No.		Pág.
2.1	Soluciones nutritivas más comunes en la producción de cultivos sin suelo.....	12
3.1	Frecuencia y volumen de riego (mL) diarios por contenedor en las diferentes etapas fenológicas del cultivo.....	27
3.2	Composición química de la solución nutritiva de Steiner ajustada por etapa fenológica.....	27
3.3	Cantidad de fertilizantes (g) y ácidos (mL) usados para preparar 2 500 L de solución nutritiva en las diferentes etapas fenológicas del cultivo.....	28
3.4	Productos usados para la protección fitosanitaria del cultivo.....	30
3.5	Tratamientos evaluados en la investigación.....	31
4.1	Significancia estadística de las variables morfológicas de las plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.....	36
4.2	Significancia estadística de las variables fisiológicas de las plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.....	43
4.3	Prueba de comparación de medias de la biomasa seca de los órganos de las plantas de pepino producidas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.....	47
4.4	Significancia estadística de la concentración de macronutrientes en las hojas de pepino cultivado en tezontle, en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.....	48
4.5	Concentración de macronutrientes en las hojas de pepino cultivado en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.....	49
4.6	Significancia estadística de la concentración de micronutrientes en las hojas de pepino cultivado en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.....	50

4.7	Concentración de micronutrientes en las hojas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.....	50
4.8	Significancia estadística del rendimiento y sus componentes del cultivo de pepino producido en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.....	51
4.9	Prueba de comparación de medias del rendimiento y sus componentes del cultivo de pepino producido en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.....	53
4.10	Significancia estadística de la calidad de los frutos de pepino cultivados en tezontle, en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.....	54
4.11	Prueba de comparación de medias de las variables de calidad de frutos de pepino producidos en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.....	55
7.1	Valores máximos y mínimos de temperatura y humedad relativa reportados durante el desarrollo del cultivo de pepino.....	77
7.2	Resultado de las características químicas del agua de pozo profundo... ..	80
7.3	Balance de la solución nutritiva aplicada en el establecimiento del cultivo.....	81
7.4	Cantidad de fertilizantes (g) y ácidos (mL) requeridos para preparar 2 500 L de solución nutritiva aplicada en el establecimiento del cultivo.....	81
7.5	Balance de la solución nutritiva aplicada en la fase vegetativa del cultivo.....	81
7.6	Cantidad de fertilizantes (g) y ácidos (mL) requeridos para preparar 2 500 L de solución nutritiva aplicada en la fase vegetativa del cultivo.....	82
7.7	Balance de la solución nutritiva aplicada en la fase de floración y marre de frutos.....	82
7.8	Cantidad de fertilizantes (g) y ácidos (mL) requeridos para preparar 2 500 L de solución nutritiva aplicada en la fase de floración y marre de frutos.....	82

7.9	Balance de la solución nutritiva aplicada en la fase de desarrollo de frutos.....	83
7.10	Cantidad de fertilizantes (g) y ácidos (mL) requeridos para preparar 2 500 L de solución nutritiva aplicada en la fase de desarrollo de frutos.....	83
7.11	Correlación entre las variables de crecimiento, rendimiento y calidad de frutos de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y la dosis de silicio.....	84
7.12	Correlación entre las variables de crecimiento, rendimiento, calidad de frutos y concentración nutrimental en hojas de plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y la dosis de silicio.....	85
7.13	Correlación entre las variables de calidad de frutos y concentración nutrimental en hojas de plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y la dosis de silicio.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No.		Pág.
2.1	Principales estados productores de pepino bajo agricultura protegida en México.....	6
2.2	Absorción y transporte del Si en plantas de arroz (a). Carga del ácido silícico en el xilema (b). Distribuciones de Si en las hojas, después de ser descargado del xilema a las células del parénquima del xilema por Lsi6 (c).....	14
2.3	Representación de las relaciones entre el silicio, el carbono y fósforo.....	18
3.1	Casa sombra (A); características físicas de los frutos (B); tezontle rojo (C).....	23
3.2	Procedimiento del establecimiento de contenedores. Llenado (A); instalación (B); total de contenedores establecidos (C).....	24
3.3	Componentes del sistema de riego. Tinacos de 2 500 L (A); Bomba y temporizador (B); líneas regantes con distribuidores (C); estacas de riego (D).....	25
3.4	Desinfección de las charolas (A); siembra (B); trasplante (C).....	26
3.5	Instalación de postes para el tutorado (A); cultivo tutorado con espaldera de malla (B).....	28
3.6	Poda de brotes secundarios (A); deshoje (B).....	29
3.7	Cosecha de frutos.....	30
3.8	Distribución de los tratamientos en un diseño de bloques completos al azar.....	31
4.1	Valores máximos y mínimos de temperatura y humedad relativa (promedio semanal) y fenología del cultivo de pepino. E= emergencia; P= plántula; EV= etapa vegetativa; F= floración; FR= fructificación.....	35
4.2	Dinámica de la longitud del tallo de las plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. R= raíz y F= foliar.....	37

4.3	Longitud del tallo de las plantas de pepino cultivadas en tezontle a los 38 ddt en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. $DMSH_{0.05}$ = diferencia mínima significativa honesta al 5 % de probabilidad del error.....	38
4.4	Dinámica del diámetro del tallo de las plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. R= raíz y F= foliar.....	39
4.5	Diámetro del tallo de las plantas de pepino cultivadas en tezontle a los 38 ddt en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. $DMSH_{0.05}$ = diferencia mínima significativa honesta al 5 % de probabilidad del error.....	40
4.6	Dinámica del número de hojas de las plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. R= raíz y F= foliar.....	41
4.7	Número de hojas de las plantas de pepino cultivadas en tezontle a los 38 ddt en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. $DMSH_{0.05}$ = diferencia mínima significativa honesta al 5 % de probabilidad del error.....	42
4.8	Área foliar de las plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. $DMSH_{0.05}$ = diferencia mínima significativa honesta al 5 % de probabilidad del error.....	44
4.9	Clorofila en hojas de las plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. $DMSH_{0.05}$ = diferencia mínima significativa honesta al 5 % de probabilidad del error.....	45
4.10	Biomasa total y distribución en los órganos de las plantas de pepino en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. $DMSH_{0.05}$ = diferencia mínima significativa honesta al 5% de probabilidad de error.....	46
4.11	Rendimiento de pepino producido en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. $DMSH_{0.05}$ = diferencia mínima significativa honesta al 5 % de probabilidad del error.....	52

RESUMEN

El pepino es un fruto muy demandado en la gastronomía por su sabor y valor nutritivo. Sin embargo, ante desafíos como la limitación de la superficie cultivable y el agua, la infestación de los suelos por organismos fitopatógenos y el crecimiento acelerado de la población humana, resalta la necesidad de usar sustratos como medio de cultivo e implementar alternativas sustentables para elevar los rendimientos, como el uso de elementos benéficos. El objetivo del presente estudio fue evaluar dos vías de aplicación de silicio: a la raíz y foliar, y tres dosis: 500, 1000 y 1500 mg L⁻¹ en la producción de pepino en tezontle cultivado en condiciones protegidas. Los tratamientos se distribuyeron en campo en un diseño de bloques completos al azar con cinco repeticiones. La aplicación de 1500 mg de silicio vía foliar aumentó la longitud del tallo y acumulación de materia seca (198.1 cm y 96.18 g, respectivamente). El diámetro del tallo y el área foliar por planta se incrementaron con el suministro de 1000 y 1500 mg en ambas vías. La dosis de 1000 mg aplicada a la raíz generó el mayor número de hojas por planta (23 hojas) y en ambas vías de aplicación el más alto contenido de clorofila en hojas (65.9 mg g⁻¹/MF vía raíz y 65.8 mg g⁻¹/MF vía foliar). El mayor rendimiento se obtuvo con la dosis de 1500 mg aplicada vía foliar (5.08 kg /planta) y vía raíz (4.80 kg / planta), que fueron superiores al rendimiento de las plantas testigo en 43.9 y 36 %, respectivamente. La firmeza de frutos, se incrementó en 19 y 20 % con la aplicación de 1500 mg al follaje y a la raíz; mientras que, esta última dosis, pero aplicada directamente a la raíz aumentó en 4.98 % el pH de los frutos. Cuando se aplicó 1500 mg a la raíz el contenido de macronutrientes en hojas aumentó; el menor incremento se observó en azufre (4.8 %) y el mayor en nitrógeno (32.9 %); en cambio al aplicar 500 mg de Si de forma foliar, el contenido de metales pesados se incrementó desde 14 % en Zn hasta 61 % en Fe, estos mismos disminuyeron con las dosis de 1000 y 1500 mg indistintamente de la forma de aplicación. La aplicación de silicio mejora la producción y calidad de frutos de pepino y la dosis más apropiada es de 1500 mg suministrada a la raíz o foliar.

Palabras clave: *Cucumis sativus*, tierra de diatomeas, elementos benéficos, sustrato, agricultura protegida.

ABSTRACT

The cucumber is a fruit in high demand in gastronomy for its flavour and nutritional value. However, in the face of challenges such as the limitation of arable area and water, the infestation of soils by phytopathogenic organisms and the accelerated growth of the human population, it generates the need to use substrates as a means of cultivation and implement sustainable alternatives to increase yields, such as the use of beneficial elements. The objective of the present study was to evaluate two routes of application of silicon: root and foliar, and three doses: 500, 1000 and 1500 mg L⁻¹ in the production of cucumber in tezontle grown under protected conditions. The treatments were distributed in the field in a randomized complete block design with five replications. The application of 1500 mg of silicon via foliar increased stem length and dry matter accumulation (198.1 cm and 96.18 g, respectively). Stem diameter and leaf area per plant were increased with the supply of 1000 and 1500 mg in both routes. The dose of 1000 mg applied to the root generated the highest number of leaves per plant (23 leaves) and in both routes of application the highest chlorophyll content in leaves (65.9 mg g⁻¹/MF via the root and 65.8 mg g⁻¹/MF via the foliar). The highest yield was obtained with the dose of 1500 mg applied foliar (5.08 kg/plant) and root (4.80 kg/plant), which were higher than the yield of the control plants by 43.9 and 36 %, respectively. The firmness of the fruits increased by 19 and 20 % with the application of 1500 mg to the foliage and root; while this last dose, but applied directly to the root, increased the pH of the fruits by 4.98%. When 1500 mg was applied to the root, the macronutrient content in leaves increased; the smallest increase was observed in sulfur (4.8%) and the largest in nitrogen (32.9%); on the other hand, when applying 500 mg of Si foliarly, the heavy metal content increased from 14 % in Zn to 61 % in Fe, these decreased with the doses of 1000 and 1500 mg regardless of the form of application. The application of silicon improves the production and quality of cucumber fruits and the most appropriate dose is 1500 mg administered to the root or foliar.

Keywords: *Cucumis sativus*, diatomaceous earth, beneficial elements, substrate, protected agriculture.

INTRODUCCIÓN

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una planta herbácea de la familia de las cucurbitáceas, originaria de las regiones tropicales del sur de Asia, donde existen registros de su presencia desde hace 3 000 años (Salazar-Salazar *et al.*, 2022). Es la cuarta hortaliza más cultivada a nivel mundial después del tomate (*Solanum lycopersicum* L.), la col (*Brassica oleracea* L.) y la cebolla (*Allium cepa* L.) (Jia y Wang, 2021). Su sabor y textura lo han hecho esencial como complemento fresco para ensaladas y en formas procesadas como encurtidos y condimentos. Además, contiene proteínas, carbohidratos, vitamina C y elementos minerales indispensables para la salud humana (Khan *et al.*, 2023). También se le atribuyen propiedades medicinales como actividad antimicrobiana, capacidad reductora de la glucemia y capacidad antioxidante (Sharma *et al.*, 2020).

La producción de pepino en sustratos y bajo condiciones protegidas en México ha aumentado significativamente durante los últimos años (Preciado-Rangel *et al.*, 2019), esto como respuesta a la necesidad de intensificar la producción agrícola para satisfacer la demanda de la población que continuará creciendo. Aunado a esto, existen otros retos y desafíos de la agricultura actual, como la reducción de la superficie de tierra cultivable, la necesidad de optimizar el uso del agua y fertilizantes, así como reducir el impacto negativo del incremento de las temperaturas (Hu *et al.*, 2022). Por esta razón, es necesario buscar alternativas que ayuden a incrementar los rendimientos aún bajo condiciones desfavorables y hacerlo de la manera sustentable. Al respecto, las investigaciones en el sector agrícola han demostrado que elementos benéficos como el silicio (Si) mejoran el crecimiento, el rendimiento de los cultivos y la calidad de las cosechas (Yuvaraj *et al.*, 2023).

El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno (Liu *et al.*, 2020) y resulta viable como complemento del manejo agronómico de los cultivos, sobre todo en aquellos que se producen sin suelo, puesto que, en estos sistemas la raíz del cultivo se desarrolla en sustratos inertes y la disponibilidad de silicio se ve limitada (Mills-Ibibofori *et al.*, 2019). Entre los principales beneficios de

este elemento para los cultivos están: la formación de una barrera física que protege del ataque de plagas y enfermedades. Esto debido a que el Si se polimeriza en gel de sílice y se concentra en los órganos de mayor transpiración (Gouranga *et al.*, 2023); ayuda a mitigar el estrés de las plantas causado por altas temperaturas, escases de agua, salinidad del suelo o sustrato y presencia de metales pesados (Duo *et al.*, 2023); favorece la absorción de macronutrientes y mejora la actividad fotosintética (Zhang *et al.*, 2018).

En el cultivo de pepino, la incorporación de este mineral a través del suelo o de las hojas mejora su producción. Faroutine *et al.* (2023) indican que las aplicaciones de Si promueven significativamente el rendimiento de frutos, el área foliar y la biomasa radical en cultivo. Por su parte, Osuna-Zárate *et al.* (2023) encontraron que la aplicación de Si incrementa el rendimiento, la calidad de frutos y la absorción de minerales. Sin embargo, no todos los cultivares responden de la misma manera. Tal es el caso de González-Terán *et al.* (2020) quienes no encontraron aumento en el rendimiento de frutos de pepino con aplicaciones foliares de Si. Por lo tanto, el efecto positivo o negativo del suministro de Si dependerá de la dosis, la forma de aplicación, del sistema de producción y de las condiciones ambientales en las que se desarrolle el cultivo (Ouellette *et al.*, 2017).

Objetivo general

El objetivo de esta investigación fue estudiar el efecto de vía de aplicación y las dosis de silicio en la producción de pepino cultivado en tezontle y en casa sombra.

Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la vía de aplicación y las dosis de silicio en el crecimiento y la producción de materia seca de las plantas de pepino.
- Conocer la influencia del silicio en la acumulación de nutrimentos en las hojas de las plantas de pepino.
- Medir el rendimiento y la calidad de los frutos de pepino en respuesta a las dosis de silicio aplicadas a la raíz y foliar.
- Determinar la vía de aplicación y la dosis de silicio más apropiadas para la producción de pepino en tezontle.

Hipótesis

Todos los tratamientos aplicados mejoran las características morfológicas, fisiológicas, de rendimiento y calidad de los frutos del cultivo de pepino producido en tezontle y bajo condiciones de casa sombra.

REVISIÓN DE LITERATURA

Origen e importancia del cultivo de pepino

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una especie de las 960 que comprende la familia de las cucurbitáceas (Park *et al.*, 2021). Su centro de origen es el sur de Asia, específicamente el clima cálido y húmedo del Himalaya en el noroeste de la India, mientras que China es reconocida como el centro de origen secundario (Weng, 2020).

Esta hortaliza es una de las cuatro cucurbitáceas de mayor importancia económica junto con el melón (*Cucumis melo* L.), la sandía [*Citrulus lanatus* (Thunb.) Matsum. y Nakai] y las calabazas (*Cucurbita* spp); a nivel mundial es la cuarta hortaliza más cultivada (Jia y Wang, 2021). Se consume en ensaladas para acompañar una gran diversidad de platillos, se usa para la preparación de aguas frescas, jugos verdes y botanas; además, se consume de manera procesada en encurtidos (Pal *et al.*, 2020). Los frutos contienen carbohidratos (2.6 g), proteína (0.6 g), calcio (18 mg), tiamina (0.02 mg), energía (12 cal), riboflavina (0.02 mg), hierro (0.2 mg), vitamina C (10 mg) y niacina (0.01 mg) en cada 100 g, lo que lo hace un fruto nutritivo (Karna, 2022).

Los frutos también son importantes en sector salud, debido a que se usan como materia prima para la elaboración de cosméticos de belleza y han demostrado actividades farmacológicas, como actividad antifúngica, antibacteriana, citotóxica, antiácida, carminativa, hipolipidémica, hepatoprotectora, hipoglucemiante, actividad contra la colitis ulcerosa, además de ser un excelente antioxidante (Chattopadhyay *et al.*, 2023).

Condiciones agroclimáticas del cultivo de pepino

Temperatura

Las plantas de pepino pueden crecer en un amplio rango de temperaturas desde 10 hasta los 38 °C, pero las temperaturas óptimas para alcanzar los mejores rendimientos oscilan entre 20 y 25 °C (Badgery *et al.*, 2019). En la germinación se necesitan temperaturas medias entre 25 y 35 °C con buena humedad en el suelo o sustrato.

Cuando el cultivo está en desarrollo y la temperatura desciende a 15 °C el crecimiento de la planta comienza a disminuir y soporta una temperatura mínima de 10 °C. En contraparte, cuando la temperatura asciende a 32 °C las plantas comienzan a sufrir estrés y pueden tolerar temperaturas máximas de 38 a 40 °C (Pal *et al.*, 2020).

Humedad relativa

Las plantas de pepino se desarrollan de manera adecuada en condiciones de humedad ambiental relativamente alta, por lo que si se cultivan en invernadero este se debe mantener en el rango de 75 a 80 % (Badgery *et al.*, 2019). Si la humedad sobrepasa el 80 %, las plantas reducen la transpiración, lo que puede provocar que disminuya el crecimiento por la limitada absorción y distribución de los nutrientes, sin embargo, cuando el valor de este elemento del clima es bajo, la transpiración aumenta excesivamente, lo que provoca deshidratación y reducción de la calidad y el rendimiento (Hettiarachchi *et al.*, 2024).

Luminosidad

Las plantas de pepino se consideran especies de día neutro, aunque se ha reportado que un fotoperiodo de 8 horas diurnas y 16 horas nocturnas es el más adecuado para este cultivo y acelera su etapa reproductiva (Tian *et al.*, 2021). Respecto a la intensidad de luz, medida en luz diaria integral (DLI), este cultivo requiere niveles relativamente altos para expresar su máximo potencial productivo. Estos deben oscilar en un rango de 20 a 30 mol m⁻²/día, y se considera óptimo para la etapa reproductiva 30 mol m⁻²/día y el mínimo debe ser de 15 mol m⁻²/día, aunque para producción de plántulas lo ideal son DLI entre 9.5 y 11 mol m⁻²/día (Cui *et al.*, 2021).

Concentración de dióxido de carbono

Las plantas de pepino bajo invernadero responden bien a las aplicaciones de CO₂. El nivel de este gas en el interior de una estructura de cubierta tiende a disminuir significativamente respecto a la concentración atmosférica del exterior, debido a que la ventilación es inferior a la tasa de consumo de CO₂ de la planta. Por lo anterior el suministro de 700 a 900 ppm de CO₂ es adecuado para mejorar la fotosíntesis, la transpiración y la producción del cultivo de pepino (Hettiarachchi *et al.*, 2024).

Producción de pepino bajo cubierta en México

En México, el cultivo de pepino es una hortaliza de gran importancia económica por los ingresos que representa su comercialización. En 2023, bajo condiciones de agricultura protegida se cosecharon 519 034 t de fruto, que generaron \$4,845,188,340 (MXN) de ingreso al país. En rendimiento promedio de pepino bajo cubierta a nivel nacional es de 112 t ha⁻¹ y los principales estados que encabezan la producción son Sinaloa, Sonora, Morelos, Baja California, Coahuila y San Luis Potosí (SIAP, 2023) (Figura 2.1).

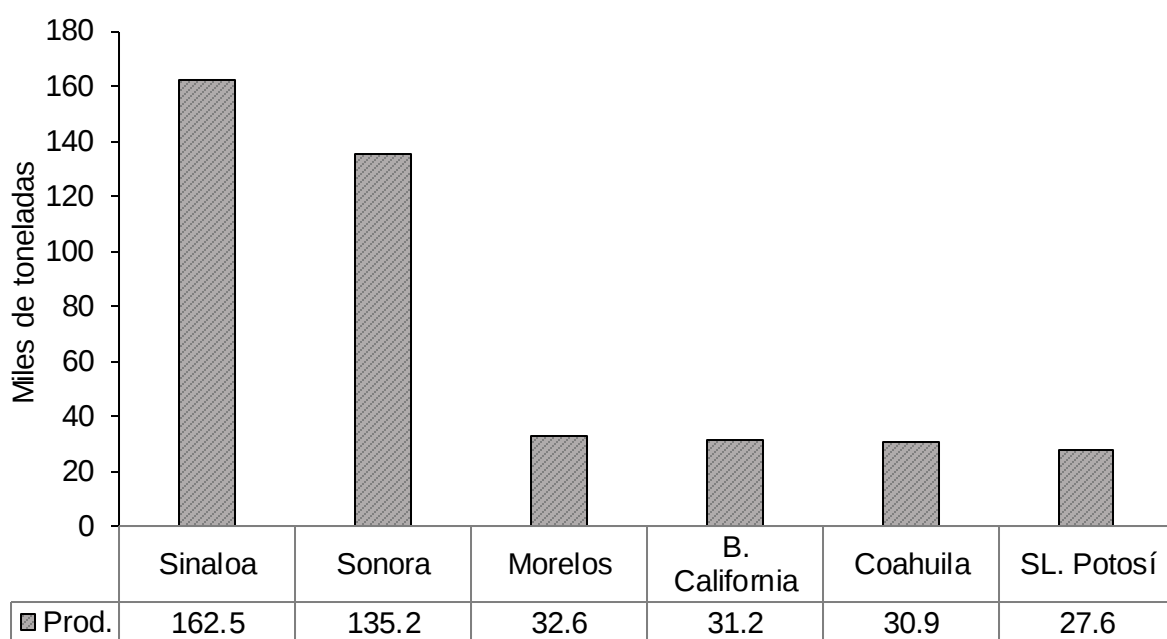


Figura 2.1. Principales estados productores de pepino bajo agricultura protegida en México (SIAP, 2023).

Producción de pepino bajo cubierta en el estado de Michoacán

El estado de Michoacán no se considera líder en la producción de pepino bajo agricultura protegida y su rendimiento en estos sistemas de producción es relativamente bajo (64 t ha⁻¹). En 2023 se produjeron 3 718.46 t, de las cuales el 47.4 % fueron en invernadero; 31.1 % en macro túnel y 21.5 % en casa sombra (SIAP, 2023).

Agricultura protegida

La producción de cultivos bajo condiciones controladas es uno de los sistemas agrícolas más intensivos, utilizado principalmente en cultivos agrícolas de alto valor, en donde se controlan parámetros ambientales y se reducen los daños generados por plagas y enfermedades (Koukounaras, 2021). Estas tecnologías han aumentado en los últimos años debido al incremento de la globalización, así como a la necesidad de un uso más eficiente de los recursos y de prácticas agrícolas más sostenibles (Castro *et al.*, 2019). Las estructuras más importantes consideradas en agricultura protegida son los invernaderos de alta, media y baja tecnología, casas y mallas sombra, macro túnel o túnel alto y micro túnel o túnel bajo (Santos *et al.*, 2014).

Importancia y beneficios

La agricultura bajo cubierta aísla el cultivo de las condiciones ambientales adversas (heladas, granizadas, fuertes vientos y tormentas) y gestiona los elementos del clima (temperatura, luz, humedad relativa y CO₂) para proporcionarle al cultivo las condiciones óptimas para su desarrollo (Kumar *et al.*, 2022); esta manipulación de los factores abióticos permite obtener producción durante todo el año y encontrar ventanas de mercado con los mejores precios (Koukounaras, 2021). La agricultura protegida tiene mayor eficiencia de la utilización del agua y de los insumos, el uso de sistemas de alta tecnología y precisión permiten obtener mayores rendimientos, estabilidad de la producción y mejor calidad de la producción (Nicola *et al.*, 2020). Además, el cultivo dentro de una estructura de protección se encuentra aislado por barreras físicas que impiden la entrada de plagas y enfermedades, aunado a esto, el uso de sustratos inertes reduce la incidencia de enfermedades fungosas en la raíz de las plantas (Amico *et al.*, 2023); lo que permite disminuir las aplicaciones de pesticidas en comparación con la producción en campo abierto, con esto las cosechas son inocuas (Lastockhkina *et al.*, 2022). Por otra parte, la urbanización y el crecimiento poblacional acelerado ha reducido drásticamente la superficie de tierras cultivables, lo que obliga al sector agrícola a producir mayor volumen de alimentos en menor espacio. En este sentido, la agricultura protegida permite usar técnicas o prácticas que ayudan a resolver esas

problemáticas como el uso de mayores densidades de población y la implementación de la agricultura vertical (Carotti *et al.*, 2023).

Cultivos sin suelo

Los cultivos sin suelo es una técnica de producción agrícola intensiva que consiste en el desarrollo de plantas con el uso de una solución nutritiva en cualquier sistema distinto al suelo (Khan *et al.*, 2023). Estos sistemas son empleados principalmente en invernaderos y en cultivos de alta rentabilidad desde hortalizas de fruto, hortalizas de hoja, flores de corte e incluso frutales (Kalaivanan *et al.*, 2022). Existen diferentes maneras de clasificar los sistemas de cultivos sin suelo, uno de ellos es de acuerdo con la reutilización de la solución nutritiva (sistemas cerrados) o no recirculación de esta (sistemas abiertos). También con base al espacio donde se desarrolla la raíz como: cultivos en solución, donde las raíces de las plantas crecen de forma total o parcial en una solución nutritiva; cultivo en sustrato sólido, donde las raíces crecen ancladas a un sustrato que puede ser de origen orgánico, inorgánico o una mezcla de ambas; cultivo nebulizado, en el cual las raíces se mantienen suspendidas en el aire y la solución nutritiva se aplica mediante nebulización directamente al sistema radicular (Hanif *et al.*, 2022; Varun y Verma, 2024).

Producción de cultivos en sustratos

La producción de cultivos en sustrato generalmente emplea sistemas de circuito abierto y se trabajan aquellas plantas de sistema radicular extenso. En esta modalidad la raíz de la planta se extiende en todo el espacio poroso del sustrato que está retenido en contenedores de plástico rígido (macetas) o plástico flexible (bolsas) (Patil *et al.*, 2020; Kalaivanan *et al.*, 2022). La elección del sustrato como medio de cultivo depende de las condiciones climáticas, las necesidades del cultivo, el tipo de equipo en el invernadero; aunque se le debe dar prioridad a los sustratos disponibles localmente (Velazquez-Gonzalez *et al.*, 2022).

Los sustratos que se utilizan con mayor frecuencia en invernaderos pueden ser de tipo poroso: tezontle, piedra pómez, basalto volcánico; sólidos: arenas y gravas; sintéticos: resinas, espuma de poliuretano, poliestireno expandido, espuma fenólica; materiales

fundidos: perlita y lana de roca; minerales: vermiculita y zeolita y orgánicos: mezcla de turbas, corteza de pino, cascarilla de arroz y fibra de coco (Sandoval-Villa *et al.*, 2016).

Importancia y beneficios

Pasar de sistemas de cultivo con suelo a sistemas en sustratos ofrece muchos beneficios, uno de ellos es producir hortalizas en zonas donde la superficie cultivable es reducida o el suelo no posee las características físicas y químicas necesarias para el desarrollo de un cultivo (Gruda, 2019). También, los sustratos inertes permiten la producción de un mismo cultivo durante ciclos indefinidos, ya que no existe un empobrecimiento de la nutrición del sustrato como sucede en los suelos; es decir, no es necesario hacer rotación de cultivos (Benko *et al.*, 2023).

Otro de los más importantes beneficios es el aumento de la eficiencia de los recursos como el agua, los nutrientes y el espacio. Este último se relaciona con el uso de altas densidades de población en espacios pequeños, incluso con la implementación de agricultura vertical (Kalantari *et al.*, 2017). Se ha descubierto que las técnicas de cultivo en sustrato reducen el uso de agua hasta en 90 % en comparación con la agricultura convencional que usa al suelo (Rajaseger *et al.*, 2023). Además, este método permite el reciclaje y la reutilización de soluciones nutritivas, y el aporte preciso de la cantidad de nutrimentos requeridos y en la etapa fenológica que más lo demande; lo que promueve el ahorro de insumos, dinero, el aumento del rendimiento y la calidad de los frutos. Aunado a esto, en los sistemas de sustratos se pueden cambiar fácilmente las características químicas importantes en la nutrición de cultivos como el pH y la conductividad eléctrica (Sandoval-Villa *et al.*, 2016).

La sostenibilidad del medio ambiente es otra ventaja del uso de sustratos, estudios demuestran que se reducen los efectos adversos de la agricultura con la implementación de sustratos. La eliminación de la dependencia del suelo evita la erosión, favorece la conservación de nutrientes y reduce su deterioro. La integración de la hidroponía con prácticas sostenibles, como el control orgánico de plagas y el reciclaje de la solución nutritiva que no permite la eutrofización, puede contribuir a la preservación del medio ambiente de la agricultura (Rajaseger *et al.*, 2023).

Los cultivos en sustrato proporcionan un entorno que reduce el riesgo de enfermedades de pudriciones de raíz, infecciones causadas por nematodos y daños por plagas del suelo, así como baja incidencia de malezas (Maucieri *et al.*, 2019).

Características de los sustratos

El sustrato es un medio que tiene como función dar soporte a la raíz de las plantas, mantener el agua en forma accesible para los cultivos, permitir un flujo adecuado de la solución nutritiva (eliminar el exceso de nutrientes), garantizar el intercambio gaseoso de las raíces y una buena sanidad del sistema radicular (Benko *et al.*, 2023). Esto se puede cumplir si se reúnen en niveles adecuados de inocuidad del sustrato y las siguientes características físicas y químicas:

Granulometría. La granulometría de un sustrato se refiere al tamaño de las partículas que lo componen, generalmente expresada en mm. Esta característica está relacionada con las propiedades hídricas y oxigenación del sustrato. Para la mayoría de las hortalizas cultivadas en invernadero se recomiendan granulometrías de 2 a 10 mm (Carlile, 2015). Cuando la mayor cantidad de volumen del sustrato tiene partículas de < 2 mm puede existir el riesgo de asfixia radicular por retener demasiada humedad, un mal flujo de la solución nutritiva y la salinización del sustrato. En contraparte, los sustratos con partículas > 10 mm no retienen suficiente humedad y es necesario hacer un gasto superior de agua (Soto-Bravo *et al.*, 2020).

Densidad aparente. Esta característica expresa el peso seco del sustrato por unidad de volumen (g cm^{-3}). Los sustratos de alta densidad pueden limitar el crecimiento de las plantas y dificultar el transporte de los contenedores, en este sentido, el nivel óptimo de este parámetro en sustratos para cultivos en contenedor varía de 0.15 a 0.5 g cm^{-3} . Existen sustratos que por su baja densidad aparente no son adecuados para ser usados solos, como es el caso de la perlita (0.1 g cm^{-3}), poliestireno (0.035 g cm^{-3}) y peat moss (0.06 g cm^{-3}) (Maucieri *et al.*, 2019).

Espacio poroso total. Se refiere a la diferencia entre el volumen total y el volumen ocupado por los sólidos del sustrato, que puede estar ocupado por aire y agua. El sustrato ideal para cultivos en maceta debe tener una porosidad de al menos el 75 % con porcentajes variables de macroporos (15 - 35 %) y microporos (40 - 60 %), en

función de la especie cultivada, de las condiciones ambientales y del cultivo (Schafer y Luíza, 2022). Esta característica está relacionada con el intercambio de gases de la raíz, la retención de humedad y el adecuado flujo de la solución nutritiva (Jones, 2015).

Capacidad de retención de humedad. Esta es una propiedad importante porque garantiza que los cultivos establecidos en el sustrato tengan niveles adecuados de humedad sin tener que realizar riegos frecuentes. Sin embargo, la capacidad de retención de agua no debe ser demasiado alta para evitar la asfixia radicular. El agua disponible para la planta se calcula por la diferencia de la cantidad de agua retenida en capacidad de campo y el agua retenida en punto de marchitamiento; esta debe estar entre el 30 al 40 % del volumen total del sustrato (Morgan, 2021).

Potencial de hidrógeno (pH). Es la propiedad química más relevante porque determina la disponibilidad de nutrientes en los sustratos, especialmente micronutrientes (Sawas y Gruda, 2018). El valor del pH se define como la actividad del ion hidrógeno, que se expresa por el logaritmo negativo de la concentración de este ion. Esta propiedad determina la acidez o alcalinidad relativa de un sustrato. Para la mayoría de los cultivos producidos bajo agricultura protegida el pH óptimo oscila entre 5.5 a 6.5, rango donde la mayoría de los nutrientes son fácilmente asimilados por la planta (Schafer y Luíza, 2022).

Conductividad eléctrica (CE). Expresa la cantidad de iones disueltos (sales, dS m^{-1}) presentes en el sustrato. Cuando se disuelven iones en el agua, estos conducen la corriente eléctrica en proporción directa a su concentración, a excepción de la urea, por lo que, de esta manera la CE puede estimar el contenido de sales solubles presentes en el sustrato (Morgan, 2021). Es preferible usar sustratos químicamente inertes o con $\text{CE} < 0.5 \text{ dS m}^{-1}$ y agregar los nutrientes requeridos por el cultivo (Maucieri *et al.*, 2019).

Capacidad de intercambio catiónico (CIC). Se refiere a la cantidad total de cargas negativas presentes en partículas sólidas del sustrato que adsorber e intercambian cationes y se expresa en $\text{meq } 100 \text{ g}^{-1}$. En este sentido, un sustrato con una CIC alta es capaz de retener más nutrientes, lo que hace que esta propiedad sea importante para regular la nutrición de los cultivos (Gruda *et al.*, 2017). Los sustratos orgánicos tienen elevada CIC ($> 40 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$), pero, para cultivos de invernadero se

recomienda usar sustratos con CIC < 20 meq 100 g⁻¹, ya que valores altos de CIC pueden desequilibrar las soluciones nutritivas y causar problemas en la nutrición vegetal (Morgan, 2021).

Inocuidad. Para que exista buena sanidad del sistema radicular y de la planta en general, los sustratos deben estar libres de patógenos como nematodos, hongos, bacterias, así como de insectos, de sustancias potencialmente fitotóxicas (pesticidas) y de semillas de malezas. Los sustratos orgánicos como la turba, cascarilla de arroz, corteza de pino y compostas son los más propensos a contener agentes biológicos indeseables. Algunos materiales de producción industrial (arcilla expandida, perlita, lana de roca, vermiculita y poliestireno) presentan altos niveles de esterilidad, debido a las altas temperaturas aplicadas durante su procesamiento (Maucieri *et al.*, 2019).

Soluciones nutritivas

Consiste en agua con oxígeno disuelto, en la cual contiene todos los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas superiores en forma iónica y totalmente balanceados dentro de los rangos fisiológicos, que son aportados de sales solubles; la solución debe mantener un pH que fluctúe entre 5.5 y 6.5 (Sukagoshi y Shinohara, 2020). Una de las soluciones nutritivas más usadas en el mundo para cultivos bajo cubierta es la diseñada por Steiner (1984), también conocida como solución universal. Esta contiene en meq L⁻¹ las siguientes concentraciones: NO₃⁻ (12.0), H₂PO₄⁻ (1.0), SO₄²⁻ (7.0), K⁺ (7.0), Ca²⁺ (9.0) y Mg²⁺ (4.0). El balance estequiométrico de la suma de aniones y la de cationes es de 20.0 meq L⁻¹ y posee 2.0 dS m⁻¹ de CE (Sandoval-Villa *et al.*, 2016). Sin embargo, existen otras soluciones nutritivas para cultivos sin suelo (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Soluciones nutritivas más comunes en la producción de cultivos sin suelo (Lara, 2000; Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012; Meselmani, 2021).

Solución Nutritiva	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
	Meq L ⁻¹						
Steiner (1961)	12.0	1.0	7.0	7.0	9.0	4.0	----
Hoagland y Arnon (1950)	14.8	1.0	4.2	6.4	8.4	4.2	1.0
Knop (1865)	15.8	2.0	2.2	4.6	13.2	2.2	----
Robbins (1946)	14.8	1.0	4.2	5.2	10.6	4.2	----
Resh (1981)	8.8	1.6	9.6	8.0	8.0	2.4	1.6
Graves (1983)	10.0	1.2	8.8	8.0	8.8	3.2	----
Hewitt (1966)	12.0	1.3	3.0	4.0	8.0	3.0	----

Elementos benéficos

Los elementos benéficos son aquellos considerados útiles para las plantas, ya que promueven el crecimiento, incrementan la resistencia a factores de estrés biótico como herbívoros y patógenos, o aumenta la tolerancia a factores de estrés abiótico como la toxicidad o la deficiencia nutrimental, la sequía, la salinidad, las altas o bajas temperaturas, entre otros (Trejo-Téllez *et al.*, 2016). Pero no son necesarios para completar el ciclo de vida de la planta o no cumplen con los criterios de esencialidad de Arnon y Stout (1939), (Kaur *et al.*, 2016). En esta clasificación se encuentra el aluminio (Al), cerio (Ce), cobalto (Co), lantano (La), sodio (Na), selenio (Se), silicio (Si), titanio (Ti), vanadio (V) y yodo (I) (Trejo-Téllez *et al.*, 2016).

Silicio

El silicio elemental (Si), después del oxígeno, es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, ocupa entre el 26 y 46 % de ella. Se encuentra principalmente como dióxido de silicio (SiO_2) y en asociación con una amplia gama de minerales que contienen Si en fases cristalinas, poco cristalinas y amorfas (Schaller *et al.*, 2021). Las plantas absorben este mineral únicamente como ácido silícico Si(OH)_4 a través de canales de tipo acuaporina y aunque no se considera esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, cada vez hay más evidencia en la literatura que muestra que este metaloide es beneficioso para las plantas, especialmente en condiciones de estrés (Luyckx *et al.*, 2017). Después de que el Si es absorbido por las plantas, el 99 % se acumula en forma silíceo en el tejido vegetal y menos del 1 % está en forma coloidal o iónica (forma soluble), por lo tanto, los sitios de almacenamiento de silicio en las plantas normalmente son responsables de mejorar la arquitectura de las hojas y de la planta en general, así como también otros procesos metabólicos como los intercambios de gases, la concentración de pigmentos fotosintéticos y el sistema antioxidante, lo que se traduce en un mejor crecimiento, rendimiento y calidad de frutos (Khan, 2024).

Absorción y transporte del silicio vía raíz

El silicio es absorbido por las raíces como ácido monosilícico $[\text{Si(OH)}_4]$, que es la forma soluble presente en el suelo con pH menor a 9 y concentración inferior a 2 mM (Tubana

et al., 2016). La absorción se genera a través del *Lsi1* que es un transportador pasivo y facilita la entrada de silicio a la exodermis. El ácido silícico sale de la exodermis y entra a la corteza de la raíz a través del transportador activo *Lsi2*, que se mueve hacia la endodermis vía apoplasto a través del parénquima. En la endodermis, la vía apoplástica está bloqueada por la banda de Caspari, que provoca que el Si sea transportado por la vía simplástica a través de *Lsi1* y luego *Lsi2* hasta el xilema. El ácido silícico se mueve de forma ascendente hasta los brotes a través de la corriente de transpiración, donde *Lsi6* (un transportador de influjo, homólogo de *Lsi1*) descarga Si del xilema y facilita su transporte a las diferentes partes aéreas de la planta (Figura 2.2). El Si se concentra y polimeriza en gel de sílice coloidal ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) en los órganos de mayor transpiración (Mandlik et al., 2020). Las plantas acumulan sílice entre 0.1 a 15 % de su peso seco. El grado de acumulación depende de los mecanismos de absorción y transporte que difieren significativamente entre especies (Kaur y Greger, 2019).

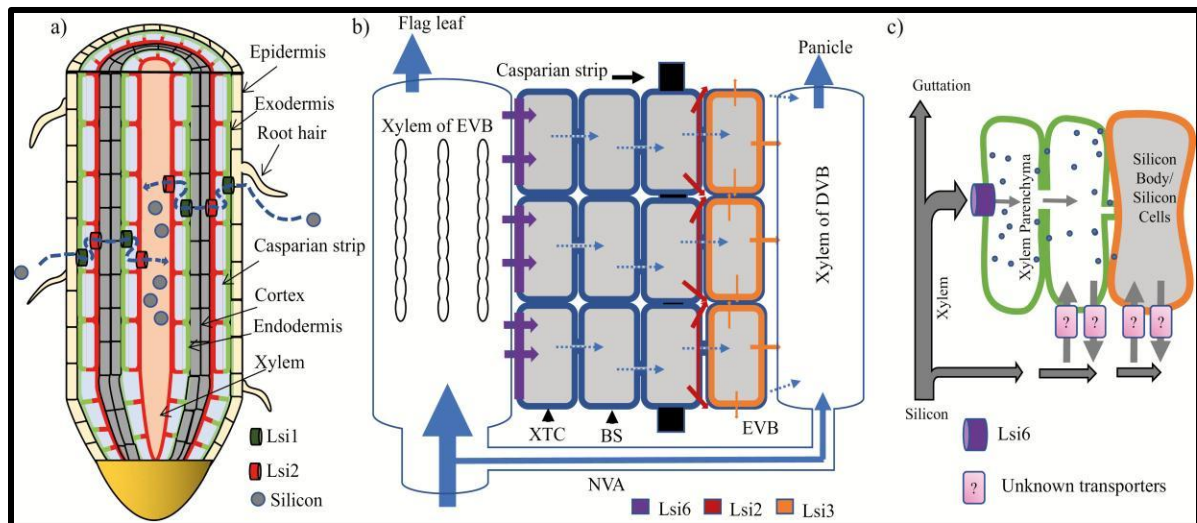


Figura 2.2. Absorción y transporte del Si en plantas de arroz (a). Carga del ácido silícico en el xilema (b). Distribuciones de Si en las hojas, después de ser descargado del xilema a las células del parénquima del xilema por Lsi6 (c). (Mandlik et al., 2020).

Absorción foliar del silicio

El silicio se absorbe de la misma forma que todos los nutrientes aplicados de forma foliar; es decir, se puede visualizar como un proceso de tres etapas: a) retención de la

solución con el elemento disuelto, en la cutícula de la hoja. b) absorción del elemento en las células metabólicamente activas y c) movilización del nutriente hasta los órganos destino (Fernández y Brown, 2013). La entrada a las células puede darse a través de los estomas, lenticelas, ectodesmos, tricomas, pero sobre todo de forma cuticular donde el nutrimento se difunde por los espacios intercelulares y espacios libres (difusión), esto es favorecido por la forma sin carga en la que se aplica generalmente el silicio (SiO_2), dado que la absorción de nutrimentos por las hojas es más rápida para aquellos iones pequeños o para moléculas sin carga (Trejo-Téllez *et al.*, 2016).

Después de la penetración del Si en las hojas por algunas de las rutas mencionadas anteriormente es transportado desde las células epidermales hasta los órganos donde la planta lo requiera, para lo cual atraviesan espacios intercelulares (apoplasto) o células de diferentes tejidos (simplasto). Una vez que el Si llega al tejido vascular (xilema y especialmente al floema), se acelera su movilidad hasta los tejidos destino (Murillo *et al.*, 2013).

Efectos benéficos del silicio en las plantas

Tolerancia a altas temperaturas y estrés por sequía

El cambio climático ha provocado el aumento de las temperaturas, mismas que repercuten de forma negativa en los sistemas de cultivo bajo cubierta, dado que, las altas temperaturas que se presentan en los invernaderos ($> 35\text{ }^{\circ}\text{C}$) están estrechamente relacionadas con el estrés hídrico de las plantas (Abdelhafez *et al.*, 2024). En este sentido, la fertilización con Si aumenta la tolerancia de los cultivos a este tipo de estrés principalmente por mejorar la absorción y transporte de agua por parte de la planta, la estabilidad de la membrana celular y el ajuste osmótico (Irfan *et al.*, 2023).

La estabilidad de la membrana celular se utiliza como un índice fisiológico para la tolerancia a la sequía, y el silicio mantiene esta estabilidad estructural y funcional mediante la reducción del daño oxidativo que a su vez se asocia con el aumento de la actividad de varias enzimas antioxidantes, por ejemplo, superóxido dismutasa (SOD)

y catalasa (CAT) (Whan *et al.*, 2019). Además, el silicio se polimeriza en las células y forma fitolitos, que se depositan en la pared celular de las células epidérmicas de las hojas para reducir la fuga de electrolitos (Irfan *et al.*, 2023).

Por otra parte, la aplicación de silicio mejora las relaciones planta-agua con reducciones significativas en la tasa de transpiración y el flujo de agua en el xilema (Maghsoudi *et al.*, 2019). Este elemento se precipita en las células epidérmicas del tallo, las hojas y la cutícula y disminuye la pérdida innecesaria de agua en las plantas bajo estrés por sequía, también se reduce la tasa de transpiración en un 30 % en cultivos como arroz. La deposición de Si en las células guarda también reduce significativamente la transpiración al mejorar la absorción de agua de la planta y el transporte al tallo y las hojas (Irfan *et al.*, 2023).

Se ha demostrado que el silicio está estrechamente relacionado con el ajuste osmótico celular, ya que en condiciones limitadas de agua este es un mecanismo eficaz para mantener más agua en las células (Osakabe *et al.*, 2014). Las plantas acumulan varios compuestos osmóticamente activos en el citosol, lo que reduce el potencial osmótico celular y mantiene la turgencia, lo que favorece la tolerancia de la planta a la sequía. La aplicación de silicio mejora el crecimiento de las plantas porque modifica la concentración de osmolitos y la acumulación de prolina que es un aminoácido no proteico que se asocia frecuentemente con el ajuste osmótico (Ahmed *et al.*, 2016).

Resistencia a plagas y enfermedades

El silicio mejora la tolerancia de las plantas contra patógenos bacterianos, fúngicos y virales, así como la infestación de plagas de insectos en cultivos económicamente importantes. Se considera que este efecto benéfico se debe a la acumulación de Si en el tejido epidérmico y a la expresión de defensas del huésped inducidas por la patogenia (Islam *et al.*, 2020). El ácido silícico polimerizado forma una membrana espesa de silicio-celulosa y puede asociarse con pectina e iones de calcio; de esta manera, una doble capa cuticular protege y fortalece mecánicamente a las plantas y aumenta la resistencia a degradación por enzimas liberadas por hongos (Gawkowska *et al.*, 2018). Además, se ha demostrado que el tratamiento de las plantas con Si trae como consecuencia cambios bioquímicos como el aumento en la síntesis de las

enzimas peroxidasa, polifenoloxidasa, glucanasa y quitinasa; las cuales están relacionadas con un incremento en la producción de quinonas que tienen propiedades antibióticas, favorecen la lignificación de los tejidos, la disminución en la calidad nutricional y la digestibilidad, lo que provoca menor preferencia de los insectos por las plantas (González *et al.*, 2015).

Por otra parte, el silicio actúa como modulador de la resistencia del huésped al patógeno mediante señales que inducen reacciones de defensa a las enfermedades. Se ha demostrado que el Si estimula la actividad de quitinasa, la activación rápida de fenoles y fitoalexinas con actividad fungistática (Parimala y Singh, 2022).

Interacción con macronutrientes

Se ha demostrado en diversos estudios que el suministro de Si favorece la movilidad, la absorción y el transporte de elementos de la rizosfera, sobre todo en plantas que son acumuladoras de silicio como arroz, pastos y caña de azúcar (Pavlovic *et al.*, 2021). La interacción positiva del Si con la mayoría de los nutrientes aún no es clara, sin embargo, las investigaciones señalan que esto sucede por cambios en las propiedades químicas del suelo o sustrato, es decir, se mejora la movilización de nutrientes de la rizosfera por los exudados de la raíz y modificación del pH. Además, el Si es capaz de controlar la disponibilidad de elementos en los suelos ya que compite por la unión a las partículas de este, dependiendo de la especiación del ácido silícico (Schaller *et al.*, 2021).

Otro efecto positivo del Si es la regulación de los genes transportadores de cada mineral que facilitan su movilización dentro de las plantas; la estimulación de la actividad de H⁺-ATPasa y los cambios de la estequiometría C:N:P, es decir, el reemplazo parcial de C por Si (Pavlovic *et al.*, 2021). Frazão *et al.* (2020) reportaron que el remplazo de C por Si indujo la disminución en la concentración de C en las plantas de caña de azúcar, pero provocó mayor producción de biomasa que resultó del incremento de la tasa de absorción y acumulación de N y P y aumento de la actividad fotosintética. Es importante resaltar que la incorporación de Si a los tejidos vegetativos es bioenergéticamente más barata que la formación de compuestos de C estructurales (Figura 2.3) (Hao *et al.*, 2020). Sin embargo, el efecto sinérgico del Si

con los nutrientes esenciales depende del tipo de suelo o sustrato, las condiciones ambientales en las que se desarrolla la planta, así como la fuente, la dosis y la vía de aplicación del Si (Hu *et al.*, 2020). En cultivo de pepino, investigaciones han reportado que la aplicación de silicio incrementó el contenido de P, K, Ca, Mg y Fe en frutos y el contenido de N y Cu en las hojas (Ozuna-Zárate *et al.*, 2023). Por su parte, Basirat y Mousavi (2022) encontraron que el suministro de Si en plantas de pepino aumentó significativamente en las hojas las concentraciones de macronutrientes hasta en 30 % y de micronutrientes hasta en 20 %.

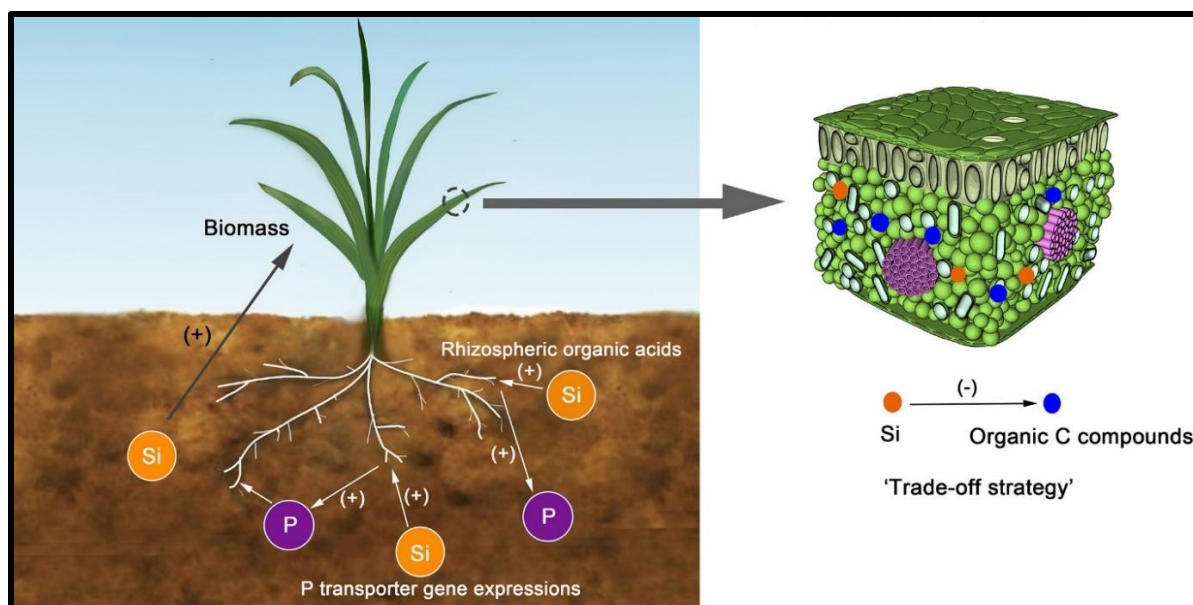


Figura 2.3. Representación de las relaciones entre el silicio, el carbono y fósforo (Hao *et al.*, 2020).

Resistencia a toxicidad por metales pesados

El Si es importante en reducir el estrés causado por metales pesados en las plantas. Existen varios mecanismos involucrados, incluida la reducción de la absorción de metales pesados por las plantas, el cambio del pH en el suelo o sustrato, la formación de complejos con metales pesados (metal-silicato) y la estimulación de la actividad enzimática (Emamverdian *et al.*, 2018).

Reducción de la absorción de metales pesados. Este proceso se genera por la formación de una barrera física creada por la acumulación de SiO_2 cerca de la endodermis que bloquea físicamente el flujo a través de la raíz, lo que inhibe el

transporte de metales pesados por los plasmodesmos y reduce sus efectos tóxicos en las células vegetales (inhibición de la vía simplasto) (Riaz *et al.*, 2022). Además de la formación de barreras físicas en la pared celular, el silicio también afecta la expresión de genes involucrados en la absorción y el transporte de metales pesados a las partes aéreas de la planta (inhibición de la vía apoplasto) (Hou *et al.*, 2023).

Cambios en el pH del suelo o sustrato. Los compuestos de silicio, como los biosólidos, aumentan el pH, lo que causa inmovilización de metales pesados, como el Cd y el Al en las plantas (Liang *et al.*, 2015). Aunado a esto, en pH alcalino aumenta la absorción de Si y se ha demostrado que las raíces comparten la misma vía de absorción de As y Si (*transportador Lsi1*). Lo que indica que una cantidad suficiente de Si disponible en el suelo provoca la reducción en la absorción y acumulación de As en las plantas (Ma *et al.*, 2008). Además, el Si puede aumentar la quelación de metales pesados a través de la estimulación del exudado de la raíz, que puede limitar la absorción o la disminución de los metales libres en los órganos de la planta (Emamverdian *et al.*, 2018).

Formación de complejos de metales pesados con Si. Este elemento, reduce la toxicidad por metales pesados en las plantas mediante el mecanismo de química de solución, es decir, formando complejos con metales pesados (Pontigo *et al.*, 2017). El Si crea un compuesto formando silicatos y óxidos con metales pesados, por ejemplo, un silicato de aluminio, lo cual disminuye la disponibilidad del Al en el suelo y la toxicidad en la planta; además reduce el Al libre en las células vegetales (Puppe *et al.*, 2023). Los silicatos solubles se hidrolizan en la solución del suelo y producen ácido metasilícico similar a un gel, que se une a los metales pesados y cambia la forma del metal de tóxico a no tóxico (Bhat *et al.*, 2019).

La coprecipitación de Si y metales en las paredes celulares de las raíces y las hojas es un medio adicional para mitigar la toxicidad de los metales (Cai *et al.*, 2022). Como ejemplo de ello, el Cd y el Zn coprecipitan con Si en las paredes celulares, en el citoplasma y las vacuolas de las células de las hojas para formar complejos de Si-metal que contribuyen a la desintoxicación celular (Hou, *et al.*, 2023). Por otra parte, el Si reduce la toxicidad de Mg y Cu porque este elemento aumenta la unión del Mn y Cu

con las paredes celulares, lo que limita las concentraciones citoplásmicas (Pavlovic *et al.*, 2021).

Estimulación de actividades enzimáticas. La concentración de especies reactivas de oxígeno (ROS) en las células vegetales normalmente es baja y representa poco peligro para el funcionamiento celular. Sin embargo, tras la exposición a la toxicidad de metales pesados, las concentraciones de ROS aumentan drásticamente, lo que desencadena una serie de cambios fisiológicos y bioquímicos que, con el tiempo, provocan la reducción del rendimiento e incluso la muerte de la planta (Hou, *et al.*, 2023). Las aplicaciones de Si aumentan la síntesis y actividad de las enzimas antioxidantes, como la superóxido dismutasa (SOD), la peroxidasa (POD), la catalasa (CAT), la ascorbato peroxidasa (APX) y la guayacol peroxidasa (GPX), para hacer frente a los efectos adversos de la alta acumulación de ROS bajo estrés por metales pesados (Lu *et al.*, 2018).

Eficiencia de la fotosíntesis

El Si influye en la fotosíntesis a través de efectos sobre la absorción y el transporte de agua (Ríos *et al.*, 2017). También promueve la modificación del intercambio gaseoso, además, tiene la función de actuar como protector del cloroplasto, lo que mejora la concentración de pigmentos relacionados con la absorción de la luz, lo que provoca un aumento de la actividad fotosintética (Jesús *et al.*, 2018). Referente a esto, Mateos-Naranjo *et al.* (2013), demostraron que el Si tiene un efecto positivo en la fotosíntesis por mejorar el intercambio de gases, la eficiencia en el uso del agua, las concentraciones de pigmentos (clorofila a y b) y la eficiencia del fotosistema II.

En plantas de pepino el Si mejora la eficiencia de la fotosíntesis por aumentar la conductancia estomática, mejorar la síntesis de clorofila y la actividad de la enzima rubisco, lo que aumenta la concentración de fotoasimilados y energía metabólica para las plantas (Shuangsheng *et al.*, 2022). El efecto positivo en la fotosíntesis ha sido reportado en otras hortalizas, como la calabacita (Savvas *et al.*, 2009), el pimiento morrón (Abdelaal *et al.*, 2020), el jitomate (Sayed *et al.*, 2022) y la lechuga (Villa *et al.*, 2024).

Antecedentes de la aplicación de silicio en el cultivo de pepino

Alkarim *et al.* (2017), evaluaron el efecto de la aplicación de diatomitas (SiO_2) de forma foliar a la dosis de 50, 100 y 200 mg L^{-1} y al suelo a la dosis de 500, 1000 y 2000 mg L^{-1} . Los autores indican que todos los tratamientos aumentaron el rendimiento de frutos comercializables (número y peso), también se incrementó significativo la firmeza de los frutos en comparación con los rendimientos y firmeza de las plantas testigo. Además, los análisis de tejidos mostraron que las plantas tratadas con Si tuvieron mayor concentración de este elemento en las hojas y frutos y se favoreció la absorción de fósforo y potasio en comparación con los tratamientos testigo.

Faroutine *et al.* (2023), estudiaron la respuesta de las plantas de pepino a la aplicación de dióxido de silicio (0, 50 y 100 mg L^{-1}) al sustrato bajo diferentes niveles de estrés hídrico; los cuales fueron: 55-65, 75-85 y 90-100 % de humedad del sustrato. Los resultados obtenidos en este estudio indicaron que, bajo los tres niveles de humedad, el Si aumentó la producción de frutos y la biomasa aérea y radical. La concentración de N, P, K y Mg en frutos, P y K en hojas, y N y K en tallos de pepino también mejoraron. Sin considerar la interacción de silicio con la humedad del sustrato, la aplicación de 50 mg L^{-1} resultó en 36.5 % más de biomasa seca aérea, 17.3 % más de área foliar y 46.5 % más de biomasa seca radical que la dosis de 100 mg L^{-1} .

Qassem *et al.* (2022), evaluaron el silicato de potasio a la dosis de 4 y 6 mL L^{-1} aplicado foliarmente como estimulante del cultivo de pepino producido bajo invernadero. Los autores concluyen que los pepinos son altamente sensibles a las aplicaciones foliares de Si, puesto que, ambas dosis lograron un aumento significativo en la producción de biomasa seca, el contenido de clorofila en hojas, el rendimiento de frutos por planta, el peso promedio del fruto y en características químicas de los frutos como los sólidos solubles, vitamina C y concentración de potasio en comparación con las plantas testigo.

González-Terán *et al.* (2020), realizaron un trabajo de investigación que consistió en estudiar los efectos de la aplicación foliar de dióxido de silicio (0 y 2 mM) sobre la materia seca de hojas y tallos, el rendimiento y la calidad de fruto de pepinos cultivados

en suelo sódico. En este estudio, la aplicación de silicio no afectó la biomasa seca, el rendimiento y el tamaño de los frutos. Sin embargo, aumentó significativamente la firmeza y el croma (verde oscuro) del fruto con respecto al control.

González-García, *et al.* (2022), evaluaron la aplicación de silicato de potasio (125, 250 y 500 mg L⁻¹) y nanopartículas de SiO₂ (125, 250 y 500 mg L⁻¹) durante el desarrollo del cultivo de pepino y su impacto en la poscosecha y el contenido de compuestos bioactivos de los frutos. Los resultados mostraron que ambas fuentes de silicio incrementaron el contenido de sólidos solubles totales hasta un 15.6 %; la acidez titulable (38.8 %); el contenido de la vitamina C (78.2 %); los fenoles (22 %); los flavonoides (64.6 %) y la actividad antioxidante en compuestos lipofílicos (56.2 %) más que el testigo.

Osuna-Zárate *et al.* (2023), investigaron el efecto del Si (silicato de potasio) a las dosis de 10 y 20 mL L⁻¹ y las sustancias húmicas sobre la productividad y absorción de minerales en pepino. Los resultados demostraron que el Si mejoró algunas características agronómicas como el número y el peso de frutos por planta, el diámetro y la longitud del fruto. Respecto a la concentración de minerales, el Si favoreció el contenido de P, K, Ca, Mg y Fe en frutos y el contenido de N y Cu en las hojas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

Localización del área experimental

La investigación se desarrolló bajo condiciones protegidas (malla con 50 % de sombra) en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Figura 3.1), ubicada en 19° 08' LN y 102° 37' LO, a 324 m de altitud, en Apatzingán, Michoacán. Esta región se clasifica con clima BS₁ interpretado como seco muy cálido con lluvias en verano y escasas a lo largo del año (García, 2005).

Metodología

Material vegetal

Se utilizó el híbrido de pepino partenocárpico Centauro. La planta tiene hojas grandes, de buena cobertura foliar y excelente capacidad de cuaje. Los frutos presentan forma cilíndrica, prácticamente lisos, de color verde oscuro y con excelente vida de anaquel; ideal para producir bajo malla sombra (Figura 3.1).

Sustrato

Como sustrato se usó tezontle rojo con granulometría < 1 cm (Figura 3.1); el cual, con este tamaño de partículas presenta las siguientes características físico-químicas: pH (7.3), conductividad eléctrica (0.15 dS m^{-1}), densidad aparente (0.73 g cm^{-3}), densidad real (2.22 g cm^{-3}), capacidad de aireación (46.6 %), capacidad de retención de agua (20.7 %), espacio poroso total (67.3 %) (Trejo-Téllez *et al.*, 2013; Martínez-Rodríguez *et al.*, 2017).



Figura 3.1 Casa sombra (A); características físicas de los frutos (B); tezontle rojo (C).

Establecimiento de contenedores

En el área de estudio se colocó un plástico blanco calibre 400 donde estuvieron situados los contenedores para evitar la incidencia de malezas durante el ciclo del cultivo. Se llenaron con el sustrato los contenedores de polietileno color negro con dimensiones de 35 × 37 cm (14 L), calibre 600. Estos se distribuyeron a hilera sencilla a una separación de 1.20 m entre hileras y 0.40 m entre contenedores (Figura 3.2). En total se usaron 210 contenedores a la densidad de población de 20 833 plantas/ha.



Figura 3.2 Procedimiento del establecimiento de contenedores. Llenado (A); instalación (B); total de contenedores establecidos (C).

Instalación del sistema de riego

Se instaló un sistema de riego por goteo automatizado. El cabezal de riego estuvo conformado por cuatro tinacos de 2 500 L de capacidad y uno de 450 L; una bomba de 3 HP y filtrado de discos. Las líneas primarias y secundarias del sistema de riego fueron de tubería de PVC de 2"; las líneas regantes fueron mangueras de 16 mm con goteros antidrenantes de 8 L h⁻¹ de gasto y distribuidores a dos estacas por cada contenedor. Además, se instaló un temporizador Steren® de ocho eventos para la programación de los riegos (Figura 3.3).

Desinfección de la casa sombra

Previo al establecimiento del experimento, se limpió el polvo y la basura de la estructura metálica de la casa sombra, así como de las mallas antiáfidos de todo perímetro. Posteriormente, con una mochila aspersora de motor de 25 L de capacidad se aplicó un desinfectante, un fungicida y un insecticida de amplio espectro. Los ingredientes activos y dosis de estos productos fueron: sales cuaternarias de amonio (10 mL L⁻¹); piraclostrobin (3 mL L⁻¹) y cloridrato de formetanato (2 g L⁻¹),

respectivamente. La mezcla se aplicó en el techo, estructuras metálicas y paredes de la casa sombra tanto en interior como el exterior.



Figura 3.3 Componentes del sistema de riego. Tinacos de 2 500 L (A); Bomba y temporizador (B); líneas regantes con distribuidores (C); estacas de riego (D).

Producción de plántulas

Las plántulas se produjeron en charolas de poliestireno expandido de 242 cavidades previamente desinfectadas por aspersión con sales cuaternarias de amonio a la dosis de 5 mL L⁻¹. Como sustrato se usó turba (Peat moss) y se depositó una semilla por cada cavidad (Figura 3.4). Posteriormente las charolas se cubrieron con un plástico negro para mantener la humedad y acelerar el proceso de germinación. Al tercer día inició la emergencia de las plántulas y se retiró el plástico. El riego de las plántulas se efectuó diariamente desde la emergencia, y cada tercer día se aplicó una solución con enraizador Rootex® (3 g L⁻¹). Para evitar problemas de ahogamiento del tallo, a los 3 días después de la emergencia se aplicó vía drench el fungicida Previcur Energy® (1 mL L⁻¹).

Trasplante

Antes del trasplante se desinfectó el sustrato con sales cuaternarias de amonio a dosis de 10 mL L^{-1} mediante el sistema de riego. La solución se aplicó hasta que se drenara de los contenedores. El trasplante se realizó a los 10 días después de la siembra cuando las plántulas presentaron la primera hoja verdadera; se colocó una plántula en el centro de cada contenedor a la profundidad del cepellón (Figura 3.4).

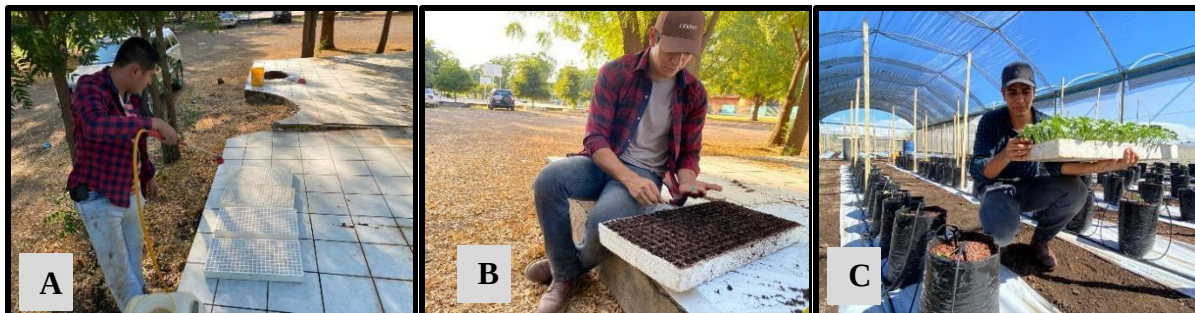


Figura 3.4. Desinfección de las charolas (A); siembra (B); trasplante (C).

Riegos

Se midió el gasto real de los goteros con la ayuda de recipientes que se colocaron en el centro del contenedor de la parte inicial, central y final de cada línea regante. Las estacas de riego se colocaron dentro del recipiente y se encendió la bomba durante un minuto; posteriormente se midió el agua colectada en cada recipiente con una probeta graduada. Este procedimiento se repitió tres veces para obtener un dato más exacto. Finalmente, se determinó por promedio el gasto real por contenedor, que fue de 140 mL min^{-1} (8.4 L h^{-1})

Se programaron riegos por pulsos diariamente mediante el temporizador digital Sterent[®], de esta manera, se suministraron por contenedor 0.350 L en la primera semana de establecimiento, 0.560 L durante la etapa vegetativa, 0.980 L al inicio de la floración y 1.40 L en toda la etapa de producción y cosecha. El primer riego se realizó a las 9:00 am y el último a las 5:00 pm (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Frecuencia y volumen de riego (mL) diarios por contenedor en las diferentes etapas fenológicas del cultivo.

Etapa fenológica	Horas								Total
	9:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	
Establecimiento	70	----	70	70	70	----	----	70	350
Etapa vegetativa	70	----	140	140	140	----	----	70	560
Floración y amarre	140	140	140	140	140	140		140	980
Desarrollo de frutos	140	140	140	280	280	140	140	140	1400

Nutrición

La nutrición del cultivo se realizó mediante la solución nutritiva universal propuesta por Steiner (1984) aplicada diariamente con cada riego. La solución se ajustó por etapa fenológica y se consideró el análisis químico del agua (Cuadro 3.2). El pH de la solución se mantuvo entre 5.8 y 6.0 mediante la adición de ácido fosfórico y sulfúrico.

Cuadro 3.2 Composición química de la solución nutritiva de Steiner ajustada por etapa fenológica.

Etapa fenológica	Meq L ⁻¹						CE [¶] (dS m ⁻¹)
	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	
Aporte del agua	0.21	0.01	0.24	0.72	2.40	0.03	
Establecimiento	5.79	0.49	3.26	3.78	0.0	3.47	1.0
Fase vegetativa	8.79	0.74	5.01	6.03	0.6	5.22	1.5
Floración y amarre	10.59	0.89	6.06	7.38	1.2	6.27	1.8
Desarrollo de frutos	11.79	0.99	6.76	8.28	1.6	6.97	2.0

[¶] CE= conductividad eléctrica, considerando los iones aportados por el agua de riego.

La concentración de los micronutrientes (mg L⁻¹) en la solución nutritiva en las tres etapas fenológicas fueron: Fe²⁺ (3.13); Mn²⁺ (1.0); B (0.2); Zn²⁺ (1.0); Cu²⁺ (0.08) y Mo (0.03), aportados por el fertilizante Kelatex Multi®, el cual está compuesto por EDTA Fe (6.25 %); EDTA Mn (2.0 %); EDTA Zn (2.0 %), EDTA Cu (0.15 %); B (0.40 %) y Mo (0.05 %). Para el caso de los macronutrientes, en el Cuadro 3.3 se describen los fertilizantes hidrosolubles usados como fuentes, así como la cantidad necesaria de cada uno para preparar 2 500 L de solución. El balance de la solución nutritiva se describe en los Cuadros 7.3 al 7.10 del anexo.

Cuadro 3.3 Cantidad de fertilizantes (g) y ácidos (mL) usados para preparar 2 500 L de solución nutritiva en las diferentes etapas fenológicas del cultivo.

Fertilizante	Fórmula química	Etapas fenológicas			
		Estable- cimiento	Fase vegetativa	Floración y amarre	Desarrollo de frutos
Nitrato de calcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1 115.1	1 778.9	2 177.1	2 442.6
Nitrato de potasio	KNO_3	507.5	696.9	810.5	886.3
Sulfato de magnesio	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-----	184.8	369.6	492.8
Sulfato de potasio	K_2SO_4	318.3	536.3	667.1	754.3
Ácido fosfórico	H_2PO_2	27.64	41.7	50.2	55.8
Ácido sulfúrico	H_2SO_4	122.9	133.2	122.9	116.1

Para complementar la nutrición del cultivo, durante la etapa vegetativa se hicieron dos aplicaciones foliares de Basfoliar® (2 mL L⁻¹) y Aminocel® 500 (2 g L⁻¹). Durante la etapa de floración y desarrollo de frutos, de forma semanal se aplicó Maxi Grow Excel® (1 mL L⁻¹), Aminocel® 500 (2 g L⁻¹) y Caltrac® (3 mL L⁻¹); todas las aplicaciones acompañadas con el adherente Inex-A® (1 mL L⁻¹).

Tutorado

A las plantas se les dio soporte mediante un tutorado de espaldera con malla de cuadrículas de 15 ×17 cm y 2.5 m de altura. Los postes para dar soporte a la malla se colocaron cada 2.5 m de distancia, con tensores al inicio y final de cada línea de cultivo (Figura 3.5).



Figura 3.5. Instalación de postes para el tutorado (A); cultivo tutorado con espaldera de malla (B).

Podas

Se realizaron podas de los brotes secundarios con la finalidad de conducir la planta a un solo tallo. Además, después de las primeras cosechas se podaron las hojas basales

de las plantas para concentrar la mayor cantidad de fotoasimilados en el desarrollo de los frutos y para mejorar la ventilación del cultivo (Figura 3.6).



Figura 3.6. Poda de brotes secundarios (A); deshoje (B).

Protección fitosanitaria

Las principales plagas y enfermedades que se presentaron en el cultivo fueron la mosca blanca (*Bemisia tabaci*), el trips (*Frankliniella occidentalis*), el minador de la hoja (*Liriomyza huidobrensis*) y el mildiu (*Pseudoperonospora cubensis*). Para mantener la sanidad de la planta se hicieron aplicaciones intercaladas de moléculas químicas y orgánicas (Cuadro 3.4), acompañados del adherente Inex-A® (1 mL L⁻¹).

Cosecha

El cultivo se trabajó hasta los 60 días después del trasplante (ddt). Las cosechas iniciaron a los 36 ddt, se hicieron a intervalos de cuatro días y en total se obtuvieron seis cortes (Figura 3.7). Como índice de cosecha se tomó la longitud de los frutos (> 18 cm), frutos de color verde oscuro y totalmente rectos.

Registro de los elementos del clima y la fenología

Durante el desarrollo del cultivo, dentro de la casa sombra se registró diariamente la temperatura y humedad relativa (valor máximo y mínimo de ambos elementos). Estos datos se midieron con un datalogger Elitech® y se reportaron como promedios semanales. También se registró el tiempo a ocurrencia de las fases fenológicas de las plantas de pepino, que fueron: emergencia, plántula, fase vegetativa, floración y fructificación.

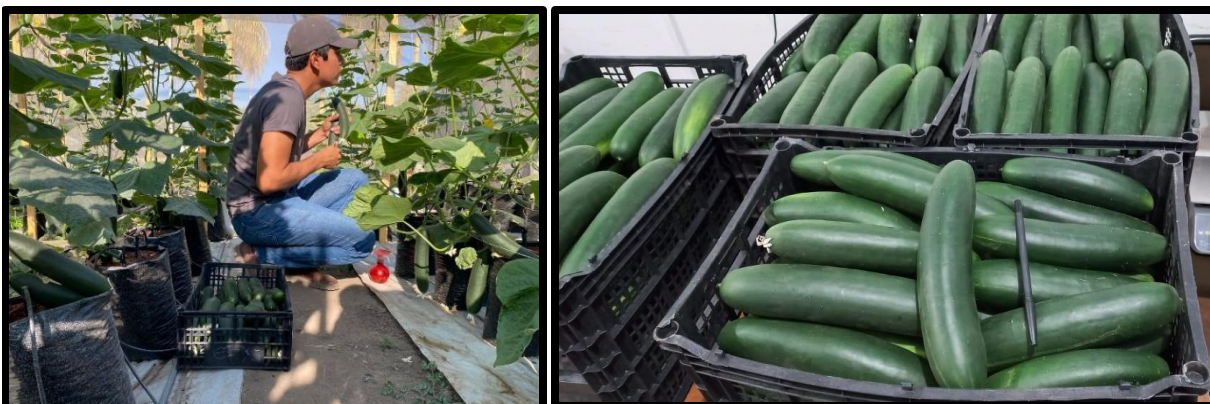


Figura 3.7. Cosecha de frutos.

Cuadro 3.4. Productos usados para la protección fitosanitaria del cultivo.

Plaga / enfermedad	Producto			Dosis (g o mL L ⁻¹)	Aplicación (ddt)
	Nombre comercial	Ingrediente activo	Clase		
Mosca blanca	Toreto®	Sulfloxaflor	Insecticida	1.0	12
	Sivanto®	Flupyradifurone	Insecticida	2.0	5, 50
	Confidor®	Imidacloprid	Insecticida	1.0	33
Trips	Palgus®	Spinetoram	Insecticida	2.0	19, 43
	Actara®	Tiametoxam	Insecticida	1.0	26
	Pickarof®	Extracto de ajo, chile, ruda y agave	Insecticida (botánico)	5.0	12, 19, 50
Minador de la hoja	Platino®	Fenpropatrín	Insecticida / acaricida	1.0	15
Mildiu	Ridomil® bravo	Metalaxil	Fungicida	3.0	15, 33
	Amistar®	Azoxystrobin	Fungicida	1.0	26

Tratamientos y diseño experimental

Se evaluaron siete tratamientos resultantes de la combinación de dos factores, las vías de aplicación y dosis de silicio (Cuadro 3.5), más un testigo absoluto. Los tratamientos se distribuyeron en campo bajo un diseño de bloques completos al azar con cinco repeticiones (Figura 3.8). La unidad experimental estuvo formada por seis plantas (una planta por contenedor). Como parcela útil se tomaron dos plantas de la parte central

para la evaluación de las variables de crecimiento y tres plantas para las variables de rendimiento y calidad de frutos.

Cuadro 3.5. Tratamientos a evaluados en la investigación.

Tratamiento	Vía de aplicación	Dosis (mg Si L ⁻¹)	Simbología
1	Raíz	500	R-500
2		1000	R-1000
3		1500	R-1500
4	Foliar	500	F-500
5		1000	F-1000
6		1500	F-1500
Testigo	Sin	0	T-0

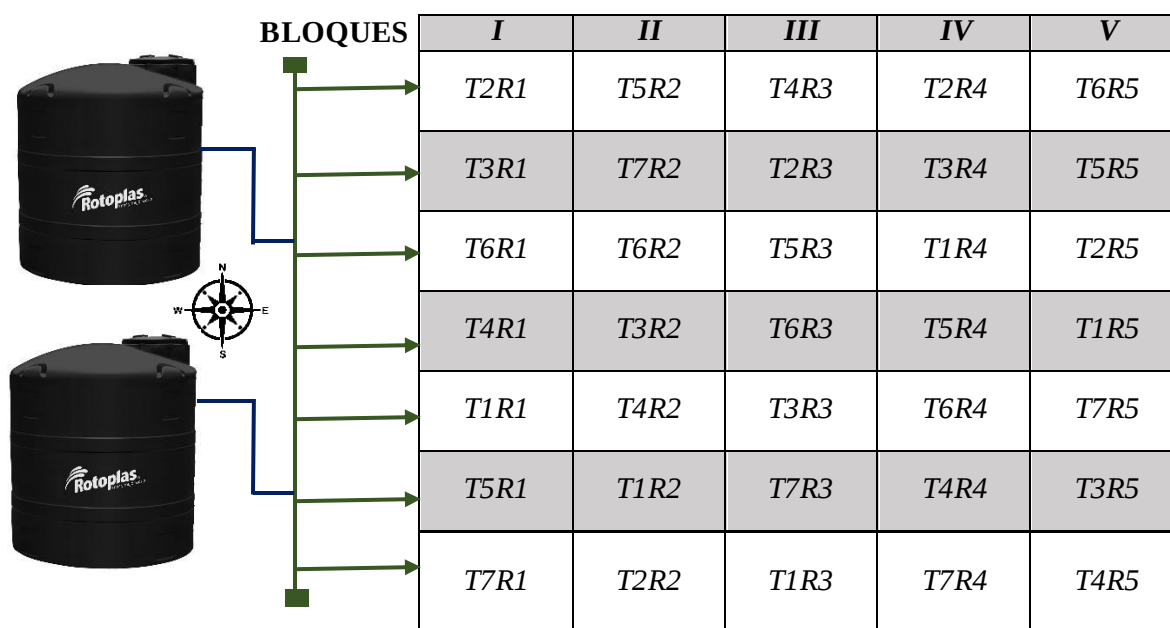


Figura 3.8. Distribución de los tratamientos en un diseño de bloques completos al azar.

Como fuente de silicio se usó tierra de diatomeas (Diatomix®) compuesta porcentualmente por 92.7 de dióxido de silicio (SiO₂), 3.6 (Al₂O₃), 1.2 (Fe₂O₃), 1.2 (CaO), 0.4 (MgO), 0.3 (K₂O), 0.3 (Na₂O), 0.2 (TiO₂) y 0.1 (P₂O₅). La cantidad necesaria para cada dosis de Si se pesó en una balanza de precisión marca Highland®. La aplicación de los tratamientos inició a los 10 días después del trasplante y se repitieron cada siete días hasta totalizar cinco aplicaciones. Las aspersiones foliares se realizaron por las mañanas para evitar deriva por el viento y hasta punto de goteo con

una aspersora manual (Truper®) de 2 L de capacidad. Para mejorar la eficiencia de la solución aplicada se adicionó el adherente Inex-A® a la dosis de 1 mL L⁻¹. Las plantas testigo se asperjaron únicamente con agua. En las aplicaciones vía raíz se usó una probeta graduada para suministrar 200 mL de solución a cada planta.

Variables morfológicas

A partir de los siete días después de la aplicación de los tratamientos se midió:

Longitud del tallo (cm): con un flexómetro (Truper®) desde el cuello del tallo hasta la yema apical.

Diámetro del tallo (mm): con un vernier digital (Truper®) en la base del tallo.

Número de hojas por planta: se contabilizaron directamente de cada planta de la parcela útil.

Variables fisiológicas

Área foliar (AF) por planta (dm²): mediante muestreo destructivo se midió el área foliar (40 ddt) con papel milimétrico y con la fórmula $AF = \text{largo de la hoja (Lh)} \times \text{ancho de la hoja (Ah)}$. Estos dos conjuntos de datos se sometieron a un análisis de regresión lineal; de esta manera se obtuvo el modelo utilizado: $AF = 0.9458 (Lh \times Ah) - 26.149$ que correlacionó en un 95 % ($r^2 = 0.95$). El AF total de la planta se obtuvo al sumar el AF de cada hoja.

Clorofila en las hojas. Esta variable se evaluó a los 40 ddt, en hojas frescas (la sexta hoja desde el ápice) mediante la absorbancia a 645 y 663 nm para clorofila a y b, respectivamente, en un espectrofotómetro. Se calculó la cantidad de clorofila por g de muestra, se usaron las ecuaciones que se muestran a continuación. La metodología utilizada fue la descrita por Senthilkumar *et al.* (2021). Clorofila **a** = $(12.7 \times A_{663} - 2.69 \times A_{645}) \times V / (1000 \times w)$. Clorofila **b** = $(22.9 \times A_{645} - 2.69 \times A_{663}) \times V / (1000 \times w)$. Clorofila **total** = $(20.2 \times A_{645} \text{ nm}) + (8.02 \times A_{663} \text{ nm})$.

Donde:

A = absorbancia (nm), **V** = volumen total del extracto, **W** = peso de la hoja fresca.

Acumulación de materia seca. Se determinó a los 65 ddt, para esto se tomaron dos plantas por unidad experimental, las cuales se separaron por órganos (raíz, tallos y hojas). El material vegetal se secó en la estufa de aire circulante forzado a la temperatura promedio de 70 °C hasta obtener peso seco constante (g). La cuantificación del peso se realizó en una balanza Highland® con precisión de 0.1 g.

Concentración nutrimental en las hojas (%). Esta variable se evaluó a los 45 ddt. De cada planta de la parcela útil se tomaron desde la 3^a-5^a hoja a partir del ápice y se analizó el N total con el método de Dumas; los demás elementos se analizaron mediante Digestión Ácida/ ICP-OES.

Variables de rendimiento y de calidad de los frutos

Rendimiento de frutos por planta (kg): se registró el peso total de la producción en cada parcela útil, y se dividió entre el número de plantas por parcela. Este parámetro fue medido con una báscula digital Rino®.

Número de frutos por planta: se contabilizó el número total de frutos por parcela útil, y se dividió entre el número de plantas evaluadas.

Peso medio de frutos: esta variable se obtuvo al dividir el peso total de frutos entre el número de frutos cosechados.

Longitud y diámetro de frutos: la longitud del fruto se midió con una regla graduada y el diámetro con un vernier digital (Truper®). Para ambos parámetros se utilizaron tres frutos de cada parcela útil.

Sólidos solubles (°Brix): estos valores se tomaron con un refractómetro digital Hanna®, para lo cual se depositaron gotas del jugo del fruto sobre el sensor. Los valores se reportaron en °Brix.

Firmeza del fruto (kg cm⁻²): se midió con un penetrómetro manual con puntera de 11 mm de diámetro (modelo GY-03) en dos lados opuestos de la región central del fruto.

pH de frutos y acidez titulable: éstas variables se determinaron con la metodología de la Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1980). Se pesaron 10 g de pulpa y se licuaron con 50 mL de agua destilada, se filtró el extracto obtenido y de este

último se tomaron 20 mL para registrar la lectura de pH con un potenciómetro (Phep®5) (método 981.12). La acidez titulable se determinó en 10 mL del extracto anterior, mediante titulación con hidróxido de sodio 0.025 N (método 942.15); los resultados se reportaron como porcentaje de ácido cítrico.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos de las variables evaluadas se sometieron a un análisis de varianza, una prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) y un análisis de correlación de Pearson mediante el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS, 2017). A las variables de longitud del tallo y número de hojas se les realizó un análisis de regresión lineal simple y al diámetro del tallo un análisis de regresión cuadrática con el paquete de Microsoft Excel versión 2016.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fenología y elementos del clima

El cultivo de pepino tuvo un ciclo de 70 días, la emergencia sucedió a los tres días después de la siembra, y se consideró plántula hasta los 10 días que fue cuando se realizó el trasplante. La fase vegetativa correspondió a los primeros 20 días después del trasplante; la floración ocurrió a los 21 días y la fructificación a los 28 días (Figura 4.1). Al respecto, Meneses-Fernández y Quesada-Roldán (2018), en el cultivo de pepino producido bajo cubierta y en sustrato, reportaron los mismos tiempos de fase vegetativa y floración, sin embargo, la fructificación inició a los 34 días después del trasplante. Esa diferencia puede ser atribuida a la de precocidad que presenta el material vegetal usado en la presente investigación y al incremento de las temperaturas en esa fase fenológica.

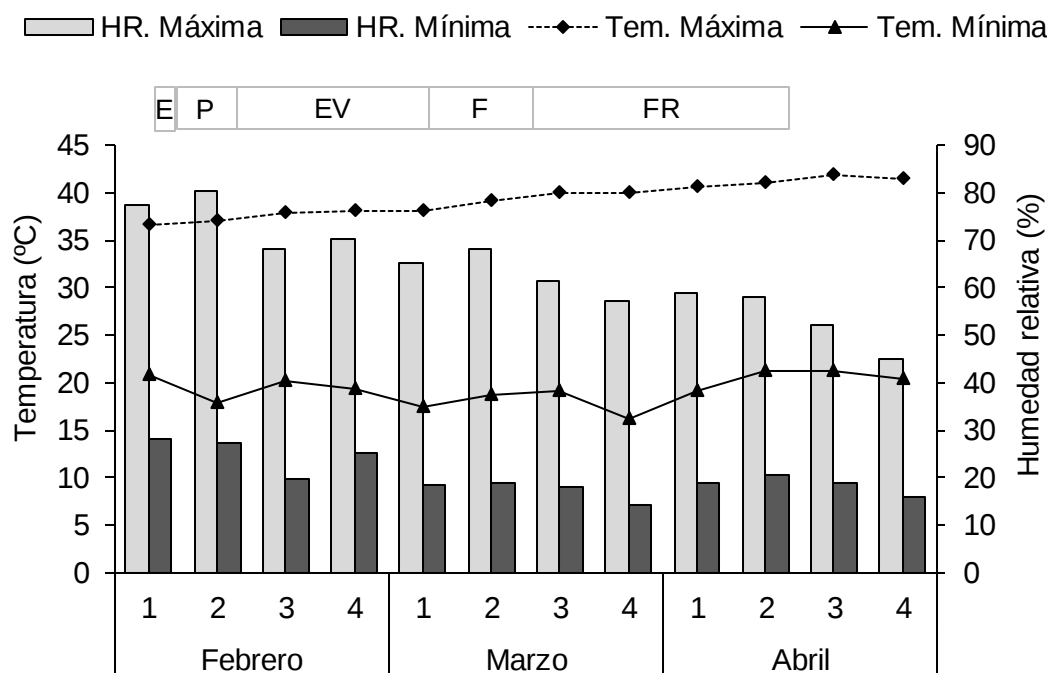


Figura 4.1. Valores máximos y mínimos de temperatura y humedad relativa (promedio semanal) y fenología del cultivo de pepino. E= emergencia; P= plántula; EV= etapa vegetativa; F= floración; FR= fructificación.

Durante el desarrollo del cultivo, los valores máximos de temperatura oscilaron entre 36.6 y 41.8 °C y de 45.13 a 77.3 % de humedad relativa. Mientras que los valores mínimos fueron de 16.2 a 21.3 °C y de 14.2 a 28.0 %. Existió una relación inversa entre la temperatura y la humedad relativa; conforme avanzó el ciclo del cultivo, las temperaturas se incrementaron, de tal forma que los valores más altos se registraron en la etapa de fructificación, mientras que la humedad relativa disminuyó conforme se presentaban las fases fenológicas e incrementaba la temperatura. Al respecto Pal *et al.* (2020) mencionan que temperaturas superiores a 40 °C en un invernadero con el cultivo de pepino puede provocar en la planta el aborto floral y malformación de frutos, por lo que se vuelve necesario buscar alternativas para reducir el estrés del cultivo.

Variables morfológicas

Longitud del tallo

La longitud del tallo de las plantas de pepino en el último muestreo (38 ddt) mostró cambios altamente significativos únicamente por la dosis de silicio aplicada (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Significancia estadística de las variables morfológicas de las plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.

Factor	LT	DT	NH
V	NS	NS	NS
D	**	**	**
V*D	NS	NS	NS

**= altamente significativo ($p \leq 0.01$), *= significativo ($p \leq 0.05$), NS= no significativo ($p > 0.05$). V= vía de aplicación, D= dosis de silicio. LT= longitud del tallo, DT= diámetro del tallo, NH= número de hojas por planta.

La longitud del tallo a través del tiempo (t) se ajustó a un modelo de regresión lineal simple el cual mostró que todas las combinaciones de vías de aplicación y dosis de silicio incrementaron la velocidad de crecimiento de las plantas respecto al testigo, sin embargo, la mayor diferencia en el incremento de la longitud del tallo se presentó en las plantas que recibieron la dosis de 1500 mg vía foliar y 1000 mg aplicado de forma foliar y a la raíz, los cuales obtuvieron una velocidad de crecimiento de 7.63, 7.59 y

7.50 cm diarios, respectivamente (Figura 4.2). Estos valores fueron superiores al crecimiento de las plantas testigo (7.02 cm/día) en 8.7, 8.2 y 6.8 %. En el último muestreo, el único tratamiento con el que las plantas presentaron una longitud del tallo estadísticamente superior al testigo fue con la aplicación foliar de 1500 mg de Si, con un incremento que representó 9.39 % (Figura 4.3).

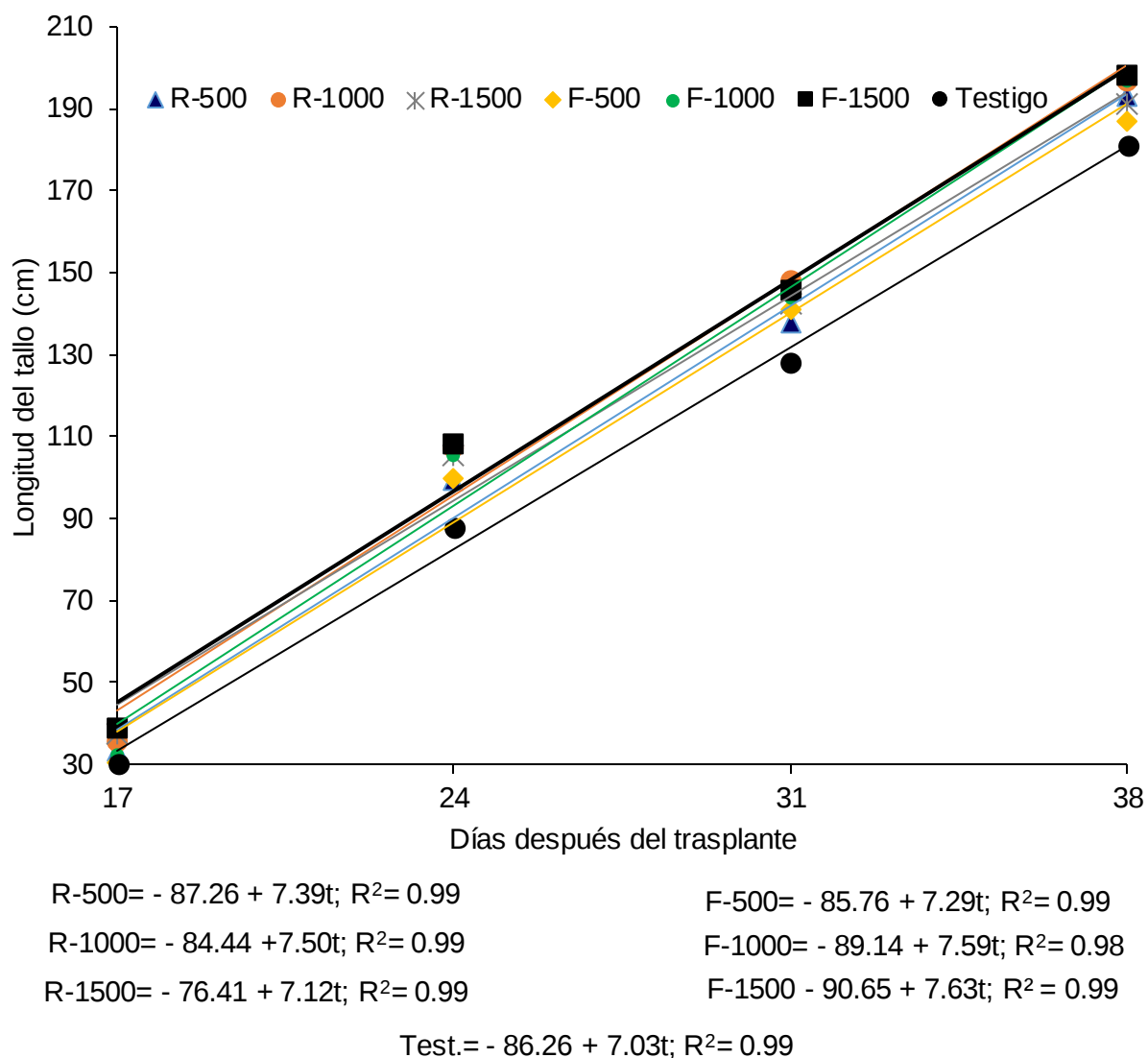


Figura 4.2. Dinámica de la longitud del tallo de las plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. R= raíz y F= foliar.

Estos resultados sugieren que a mayor concentración de Si en la solución aplicada se favorecen el crecimiento de las plantas de pepino, caso contrario se observa en

cultivos de la familia Poaceae, los cuales incrementan el crecimiento de forma significativa con dosis bajas de Si (1 a 2.5 mmol L^{-1}) (Ramírez-Olvera *et al.*, 2021), como ocurre en el trigo (Keller *et al.*, 2015), el sorgo (Chen *et al.*, 2016) y el arroz (Ramírez-Olvera *et al.*, 2021). Esto puede ser atribuido a que las cucurbitáceas no se consideran plantas acumuladoras de este elemento ($< 1 \%$ de Si en materia seca), es decir que absorben el Si mucho más lento que las plantas consideradas acumuladoras ($> 1 \%$), como la caña de azúcar, el arroz y el trigo (Dorais y Thériault, 2018) y cierto porcentaje de la fuente aplicada no es aprovechada, por lo tanto, para las hortalizas como el pepino se requieren mayor número de aplicaciones o dosis altas de este elemento benéfico.

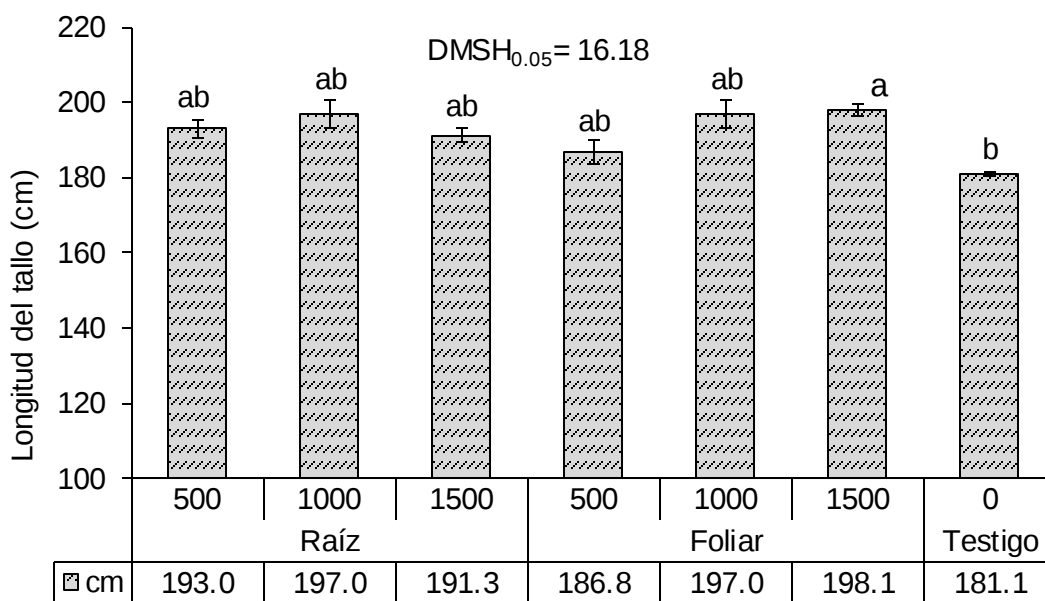
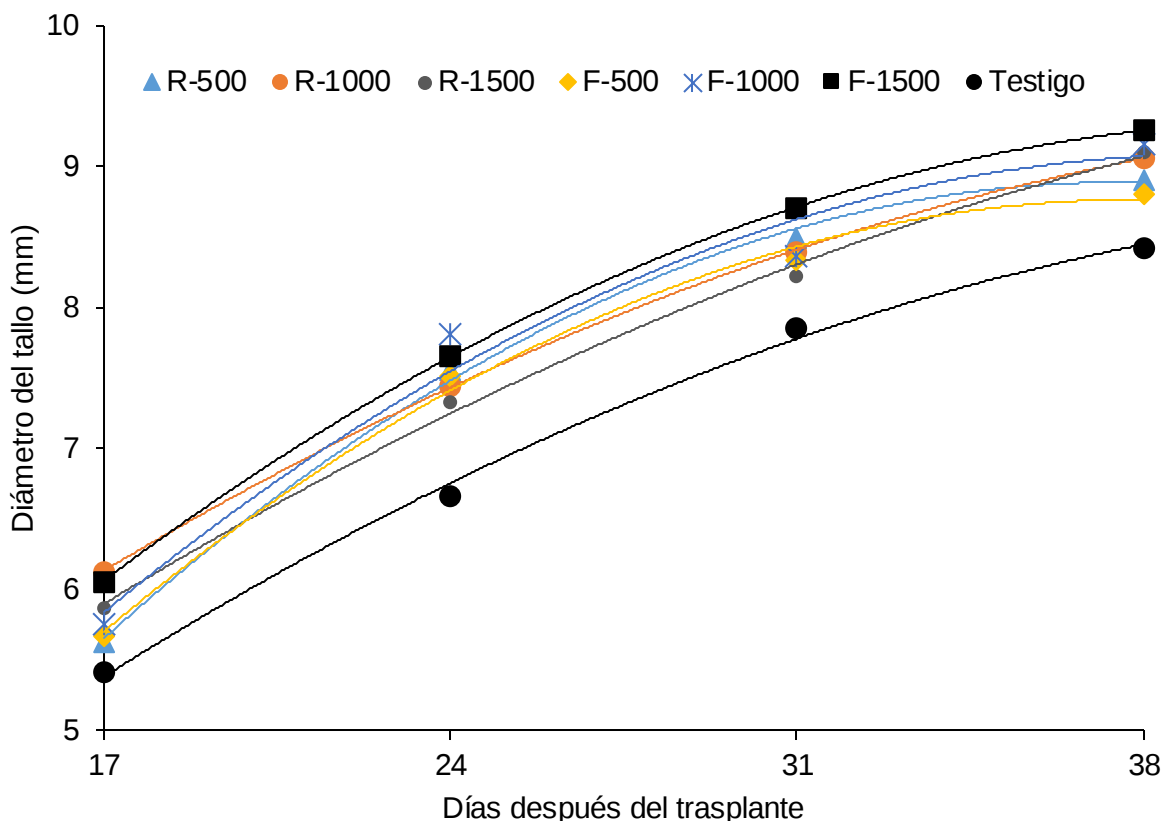


Figura 4.3. Longitud del tallo de las plantas de pepino cultivadas en tezontle a los 38 ddt en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. $DMSH_{0.05}$ = diferencia mínima significativa honesta al 5 % de probabilidad del error.

Diámetro del tallo

El diámetro del tallo en el último muestreo presentó diferencias altamente significativas por efecto de la dosis de silicio, en cambio, la vía de aplicación y la interacción $V * D$ no generaron cambios estadísticos (Cuadro 4.1). El comportamiento del diámetro del tallo a través del tiempo y en función de la combinación de vías de aplicación y dosis

de silicio se ajustó a modelos de regresión cuadrática, los cuales mostraron que las plantas que lograron un mayor incremento diario del diámetro (0.56 mm) fueron las que recibieron 1500 mg de Si aplicados vía foliar, que superó el incremento logrado en las plantas del testigo en 64.7 % (Figura 4.4). Sin embargo, la dosis de 1500 mg aplicada a la raíz y 1000 mg en ambas vías obtuvieron velocidades de crecimiento similares (entre 5.5 y 5.1 mm diarios).



R-500 = $-0.0060t^2 + 0.40t + 1.90$; $R^2 = 0.99$ F-500 = $-0.0064t^2 + 0.43t + 1.29$; $R^2 = 0.99$
R-1000 = $-0.0070t^2 + 0.55t - 1.62$; $R^2 = 1.0$ F-1000 = $-0.0064t^2 + 0.51t - 0.93$; $R^2 = 0.98$
R-1500 = $-0.007t^2 + 0.55t - 1.42$; $R^2 = 0.99$ F-1500 = $-0.0073t^2 + 0.56t - 1.5$; $R^2 = 0.99$
Test. = $-0.0036t^2 + 0.34t + 0.59$; $R^2 = 0.99$

Figura 4.4. Dinámica del diámetro del tallo de las plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. R= raíz y F= foliar.

En el último muestreo (38 ddt), las plantas de pepino con mayor diámetro de tallo fueron a las que se les aplicó las dosis más altas de Si (1500 y 1000 mg) en ambas vías; esto como resultado de una mayor velocidad de incremento diario del grosor del

tallo. Estas combinaciones generaron valores que superaron significativamente el diámetro del tallo de las plantas testigo, entre 7.6 % con la dosis de 1000 mg aplicada a la raíz y 10 % con la dosis de 1500 mg suministrada mediante aspersión foliar (Figura 4.5). En cambio, la dosis más baja aplicada tanto en raíz como de forma foliar generaron valores de 8.91 y 8.81 mm respectivamente, y fueron estadísticamente similares al obtenido en las plantas que no se les aplicó Si.

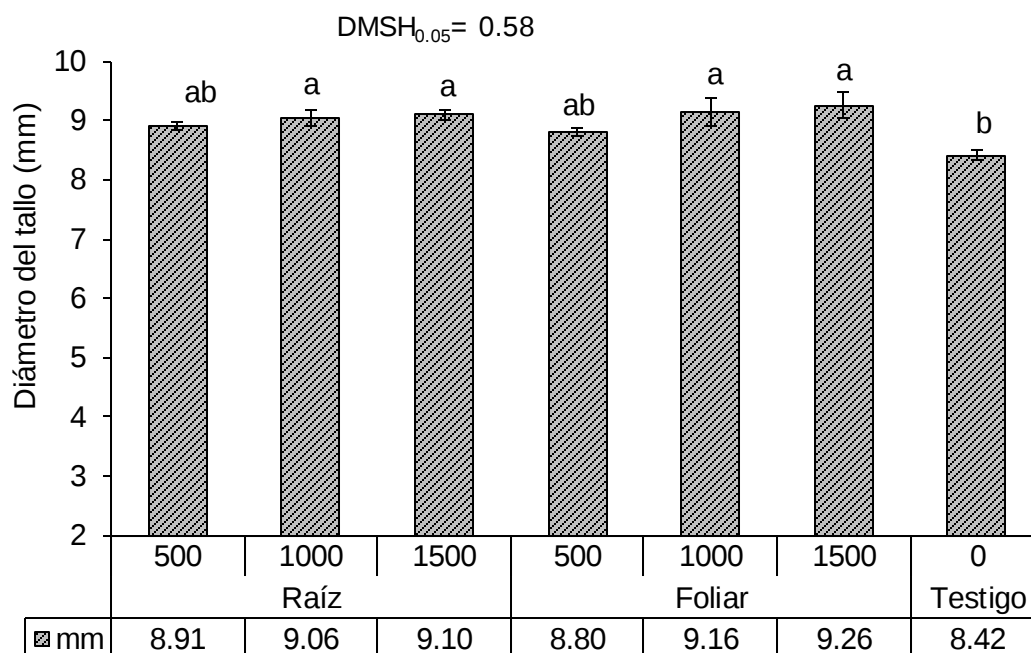


Figura 4.5. Diámetro del tallo de las plantas de pepino cultivadas en tezontle a los 38 ddt en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. $DMSH_{0.05}$ = diferencia mínima significativa honesta al 5 % de probabilidad del error.

En otros estudios como el de Reyes-Pérez *et al.* (2024) encontraron que con dosis de 210 a 270 mg L⁻¹ de Si lograron incrementar significativamente el diámetro del tallo de las plantas de pepino hasta en 11.5 % comparado con las que no recibieron aplicación. La discrepancia en la respuesta de las plantas con dosis bajas en comparación con la del presente estudio se puede atribuir al cultivar utilizado y las diferencias climáticas de las dos investigaciones. Por su parte, Hu *et al.* (2021) con aplicación de Si en pepino obtuvieron que el diámetro del tallo fue de 9.1 mm, valor superior al obtenido en las plantas testigo en 4 %, datos que son similares a los de esta investigación. Es importante señalar que aumentar el diámetro del tallo de las plantas es beneficioso, ya

que existe relación positiva entre el diámetro del tallo y el rendimiento (Ntawuguranayo *et al.*, 2024) y también relación con la producción de biomasa (Matsui *et al.*, 2016).

Número de hojas por planta

El número de hojas presentó diferencias altamente significativas por efecto de la dosis de Si, en cambio, la vía de aplicación y la interacción de V *D no provocaron cambios estadísticos en esta variable (Cuadro 4.1). La producción de hojas de las plantas de pepino a través del tiempo y en función de la vía de aplicación y dosis de silicio se ajustó a modelos de regresión lineal simple. Los modelos muestran que todas las combinaciones presentaron una velocidad de producción de hojas similar, con valores entre 0.78 y 0.80 hojas/día, superiores al obtenido en las plantas testigo (0.71 hojas/día) (Figura 4.6).

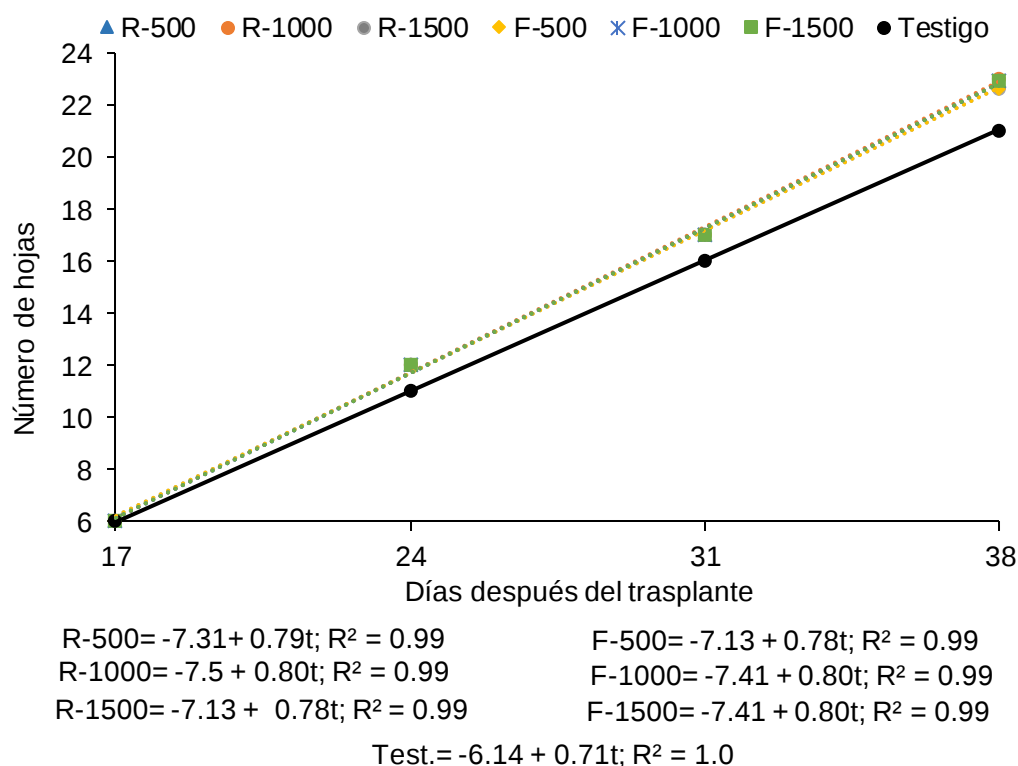


Figura 4.6. Dinámica del número de hojas de las plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. R= raíz, F= foliar.

Sin embargo, las diferencias estadísticas se observaron únicamente en el último muestreo, donde la dosis de 1000 mg suministrada a la raíz generó la mayor

producción de hojas y fue la única combinación que superó significativamente el número de hojas de las plantas testigo, con un aumento que representó 9.5 %. El resto de las combinaciones obtuvieron medias entre 22.6 y 22.9 hojas y fueron estadísticamente iguales a la media obtenida en las plantas sin aplicación de Si (Figura 4.7).

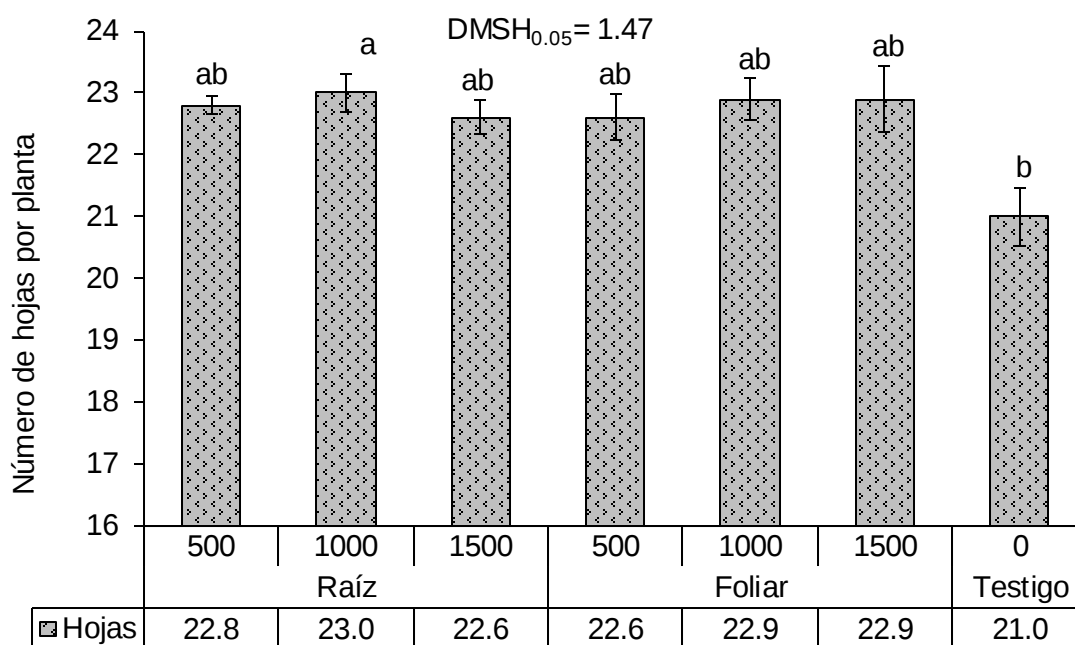


Figura 4.7. Número de hojas de las plantas de pepino cultivadas en tezontle a los 38 ddt en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. $DMSH_{0.05}=$ diferencia mínima significativa honesta al 5 % de probabilidad del error.

La mayor producción de hojas se atribuye al crecimiento más acelerado que se obtuvo con las dosis altas de Si observado en la variable longitud del tallo, dado que, en cada entrenudo se genera una nueva hoja. Esto se sustenta con lo publicado por Shehata *et al.* (2018) quienes al suministrar silicato de potasio lograron obtener 25 hojas en plantas de pepino comparado con 16 hojas producidas en las plantas testigo, asociado a las diferencias en el crecimiento de la planta, puesto que, las plantas tratadas con Si tuvieron alturas de 217.3 cm y las plantas sin aplicación lograron alturas de 170 cm. La mayor producción de hojas por planta por efecto del Si también se ha observado en otras hortalizas como el jitomate; al respecto Cázares-Flores *et al.* (2023) encontraron incrementos de hasta 11.3 % en las plantas tratadas con este mineral

respecto al testigo. Lo anterior demuestra el beneficio del Si sobre las características morfológicas de la planta, lo que puede atribuirse a que este mineral afecta de forma positiva elementos importantes en el crecimiento vegetativo, como el N (Cuadro 4.9), es decir, el Si favorece su absorción, distribución en la planta y asimilación (Gou *et al.*, 2020).

Variables fisiológicas

Área foliar por planta

Esta variable mostró cambios altamente significativos por efecto de la dosis de Si aplicada y cambios significativos por efecto de la vía de aplicación; la interacción de D * V no modificó estadísticamente el área foliar (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2. Significancia estadística de las variables fisiológicas de las plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.

Factor	AF	CH	MSH	MST	MSR	MT
V	*	NS	NS	NS	*	NS
D	**	*	**	NS	*	**
V*D	NS	*	NS	NS	NS	NS

**= altamente significativo ($p \leq 0.01$), *= significativo ($p \leq 0.05$), NS= no significativo ($p > 0.05$). V= vía de aplicación, D= dosis de silicio. AF= área foliar. CH= clorofila en las hojas. MSH= materia seca de hojas. MST= materia seca de tallos. MSR= materia seca de raíz. MT= materia seca total.

Todas las combinaciones generaron áreas foliares significativamente superior a la obtenida en las plantas testigo, a excepción de la dosis de 500 mg suministrada a la raíz. Sin embargo, las plantas que recibieron 1000 y 1500 mg de Si en ambas vías de aplicación obtuvieron la mayor área foliar, con medias en un rango de 73.36 a 75.52 dm²/planta, las cuales superaron las plantas del testigo en 17.9 y 21.4 % respectivamente. Cuando se aplicó de forma foliar 500 mg de Si se obtuvo un área foliar de 69.94 dm²/planta, que también superó a la media obtenida en las plantas que no recibieron aplicación, pero en menor porcentaje (12.40 %) (Figura 4.8). Los incrementos anteriores se deben en parte a la mayor producción de hojas que se logró en las plantas tratadas con Si. Los resultados anteriores se asemejan a los publicados por Faroutine *et al.* (2022) quienes encontraron que con la aplicación de 50 mg L⁻¹ de

Si lograron aumentar el área foliar de las plantas de pepino en 29.7 %. Asimismo, Cázarez-Flores *et al.* (2023) publicaron que al aplicar 20 mg de Si se incrementó ligeramente el área foliar por planta (8.56 %) del cultivo de pepino.

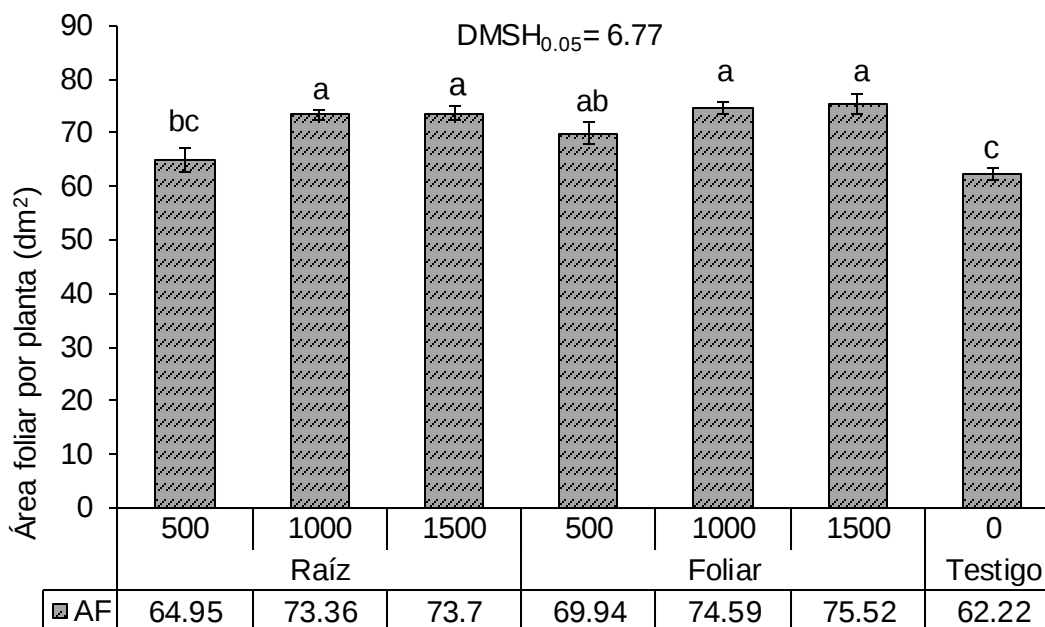


Figura 4.8. Área foliar de las plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. DMSH_{0.05}= diferencia mínima significativa honesta al 5 % de probabilidad del error.

El presente estudio demuestra que este elemento benéfico mejora la morfología de las plantas en términos de área foliar, lo que resulta beneficioso, ya que las hojas son el órgano donde se desarrolla la mayor actividad fotosintética y se forman los compuestos orgánicos y energía metabólica que impactará directamente en el rendimiento del cultivo (Domaratskyi, 2021). Además, el crecimiento del área foliar de un cultivo determina la cantidad de intercepción de luz solar y es un parámetro importante para determinar la productividad de las plantas en términos de biomasa y rendimiento de frutos (Weraduwa *et al.*, 2015).

Clorofila en las hojas

Esta variable no mostró cambios estadísticos por efecto de la vía de aplicación, sin embargo, presentó modificaciones significativas por las dosis de Si aplicada y la interacción V * D (Cuadro 4.2). El contenido de clorofila en hojas de pepino incrementó

significativamente con todas las combinaciones evaluadas con relación al testigo, a excepción de la dosis de 500 mg suministrada a la raíz. Sin embargo, la dosis de 1000 mg aplicada a la raíz y foliar generó la más alta concentración de este pigmento en las hojas, con medias de 65.94 y 65.81 mg g⁻¹/MF que superaron al testigo en 15.4 y 15.2 % respectivamente (Figura 4.9).

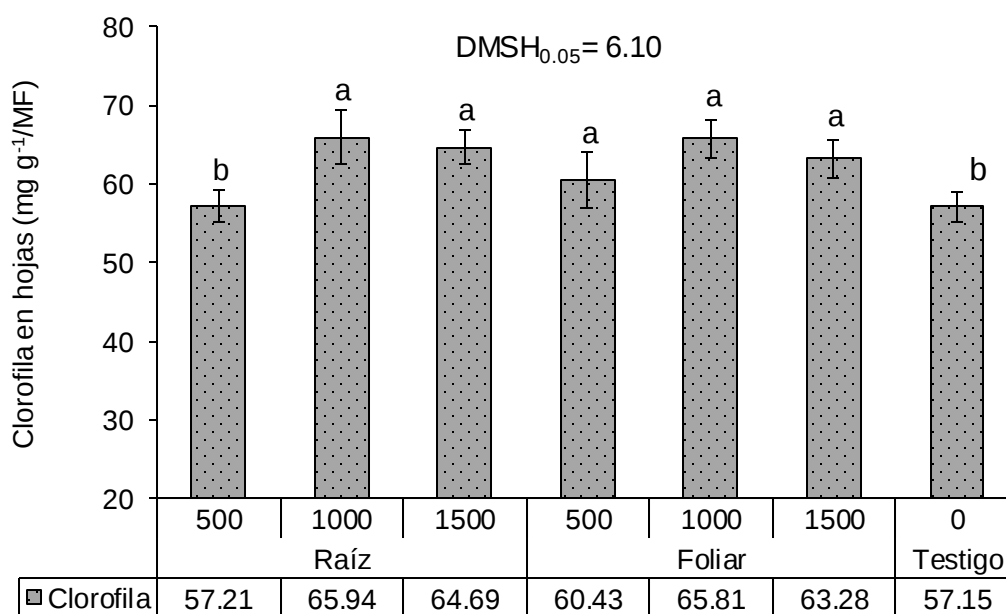


Figura 4.9. Clorofila en hojas de las plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. DMSH_{0.05}= diferencia mínima significativa honesta al 5 % de probabilidad del error.

Este beneficio del Si lo han determinado otros investigadores; Vercelli *et al.* (2017) incrementaron significativamente el contenido de clorofila en hojas de pepino en 24 % respecto a las plantas del testigo, cuando aplicaron una fuente de Si al 16 % de SiO₂. Por su parte, Qassem *et al.* (2022), también en pepino, aumentaron el contenido de clorofila en 29.2 % con aplicaciones foliares de silicato de potasio. Estos resultados, aunados a los de la presente investigación se pueden atribuir a que el Si promueve el apilamiento de la lámina de grana, lo que aumenta el número de tilacoides y además mejora el contenido de clorofila (Bu *et al.*, 2024). Otro beneficio del Si es que favorece la absorción del Mg, lo cual se observa en el Cuadro 4.5 de esta investigación, y este mineral es fundamental para la fisiología vegetal, ya que es componente estructural de la clorofila (Ahmed *et al.*, 2023), lo que favorece el rendimiento, debido a que se

incrementa la actividad fotosintética y la producción de fotoasimilados que serán usados en los órganos sumidero (Jesús *et al.*, 2018).

Acumulación de materia seca

El análisis de varianza mostró cambios significativos por efecto de la vía de aplicación únicamente en la materia seca de la raíz. La dosis de Si aplicada generó modificaciones altamente significativas en la materia seca de las hojas y total, y cambios significativos en la biomasa de la raíz. La interacción V * D no mostró significancia estadística (Cuadro 4.2). La materia seca de hojas representó el mayor porcentaje de la producción total por planta, seguido del tallo y la raíz (Figura 4.10).

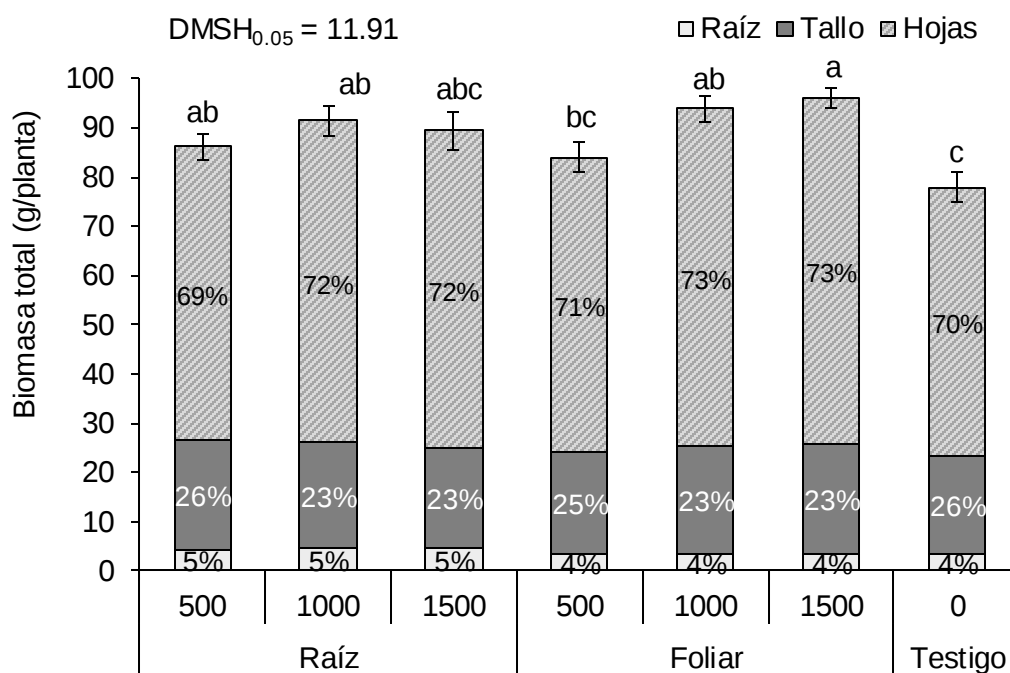


Figura 4.10. Biomasa total y distribución en los órganos de las plantas de pepino en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. DMSH_{0.05}= diferencia mínima significativa honesta al 5 % de probabilidad de error.

Las plantas a las que se les aplicó 1500 mg de silicio vía foliar lograron la mayor producción de materia seca, seguido de las plantas que recibieron 1000 mg en la misma vía de aplicación y 1000 mg suministrados a la raíz lo que se atribuye principalmente a la mayor producción de materia seca por órgano que se obtuvo con

las mismas combinaciones y que superaron al testigo en 23.5, 20.6 y 17.4 % respectivamente (Figura 4.10).

La materia seca de la raíz se incrementó significativamente respecto al testigo solo cuando el silicio se suministró directamente a este órgano en las tres diferentes dosis, sin embargo, la que obtuvo el mayor incremento (41.10 %) fue la de 1000 mg (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.3. Prueba de comparación de medias de la biomasa seca de los órganos de las plantas de pepino producidas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.

Vía de aplicación	Silicio (mg L ⁻¹)	Raíz	Tallo	Hojas
Raíz	500	4.40 abc [¶]	22.00 a	59.80 ab
	1000	4.60 a	21.40 a	65.40 ab
	1500	4.46 ab	20.60 a	64.40 ab
Foliar	500	3.44 bcd	20.80 a	59.70 ab
	1000	3.46 bcd	21.80 a	68.60 a
	1500	3.38 cd	22.60 a	70.20 a
	Testigo	3.26 d	20.20 a	54.40 b
Probabilidad de F		**	ns	**
DMSH		1.05	3.47	11.24
Coeficiente de variación		13.57	8.12	8.86

[¶]Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$). **= altamente significativo ($p \leq 0.01$); ns= no significativo ($p \geq 0.05$). DMSH= diferencia mínima significativa honesta. CV = Coeficiente de variación.

Estudios han demostrado que la aplicación de Si tiene un efecto de bioestimulante del sistema radicular, por lo que aumenta el número de raíces laterales y mejora las características morfológicas de las mismas, como el diámetro y la longitud (Tripathi *et al.*, 2021). En hojas se observó que la aspersión foliar de Si a la dosis de 1000 y 1500 mg incrementaron la producción de materia de este órgano en un 26 y 29 %, respectivamente comparado con las plantas sin aplicación (Cuadro 4.3), lo que se relaciona al incremento del área foliar que se logró con éstas mismas combinaciones, por lo tanto, se tuvo mayor intercepción de radiación solar, mejor eficiencia de la tasa fotosintética y acumulación de fotoasimilados, lo que provocó el aumento de la materia seca (Zavala-Borrego *et al.*, 2021). Además de este efecto indirecto, el Si mejora la eficiencia de la fotosíntesis en plantas de pepino por aumentar la conductancia

estomática, mejorar la síntesis de clorofila y la actividad de la enzima rubisco (Shuangsheng *et al.*, 2022).

Concentración de macronutrientos en las hojas

El análisis de varianza mostró cambios altamente significativos para la vía de aplicación solo en la concentración de K y S en hojas. En cambio, la dosis de Si aplicada generó cambios altamente significativos en la concentración de los seis macronutrientos. La interacción de V * D mostró cambios altamente significativos en P, K y S y cambios significativos en la concentración de N (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4. Significancia estadística de la concentración de macronutrientos en las hojas de pepino cultivado en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.

Factor	N	P	K	Ca	Mg	S
V	NS	NS	**	NS	NS	**
D	**	**	**	**	**	**
V*D	*	**	**	NS	NS	**

**= altamente significativo ($p \leq 0.01$), *= significativo ($p \leq 0.05$), NS= no significativo ($p > 0.05$).
V= vía de aplicación, D= dosis de silicio.

Todas las combinaciones incrementaron la concentración de N y Ca en hojas respecto al testigo. Las plantas a las que se les aplicó 1500 mg de Si a la raíz mostraron la mayor concentración de N, P y K, con incrementos que representaron 33, 22 y 15 %, respectivamente. Los valores más altos de Mg se obtuvieron al suministrar 1500 mg de Si en ambas vías de aplicación y de S solo vía foliar, los cuales superaron significativamente la concentración obtenida en las plantas testigo (12.9 % en Mg) y (16.1 % en S). Generalmente, la concentración más baja de macronutrientos en hojas se encontró en las plantas que no recibieron aplicación de Si, sin embargo, la dosis de 500 mg aplicada vía foliar generó concentraciones de K y S inferiores al testigo (Cuadro 4.5).

Este efecto positivo del Si sobre la absorción y acumulación de nutrientes en plantas de pepino también ha sido reportado por Faroutine *et al.* (2023); estos autores mencionan que con la aplicación de dióxido de silicio al sustrato se favoreció la concentración de macronutrientos en frutos (N, P, K y Mg) en hojas (P y K) y en tallos

(N y K). Asimismo, Osuna-Zárate *et al.* (2023) reportaron que la aplicación de Si en forma de silicato de potasio favoreció el contenido de P, K, Ca, Mg y Fe en frutos y el contenido de N y Cu en hojas.

Cuadro 4.5. Concentración de macronutrientes en las hojas de pepino cultivado en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.

Aplicación	Silicio (mg L ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	S
		(%)					
Raíz	500	6.79 b [¶]	0.41 d	3.03 b	3.66 a	0.99 ab	1.24 bc
	1000	6.97 ab	0.41 d	2.84 cd	3.92 a	1.04 a	1.21 c
	1500	7.11 a	0.50 a	3.29 a	3.90 a	1.05 a	1.30 b
Foliar	500	6.98 ab	0.45 bc	2.45 e	3.84 a	1.00 ab	1.05 d
	1000	6.90 ab	0.46 b	2.68 d	3.78 a	1.00 ab	1.11 d
	1500	6.79 b	0.43 cd	2.94 bc	3.98 a	1.05 a	1.44 a
	Testigo	5.35 c	0.41 d	2.86 c	3.25 b	0.93 b	1.24 bc
Probabilidad de F		**	**	**	**	**	**
DMSH _{0.05}		0.29	0.02	0.16	0.39	0.09	0.06
Coeficiente de variación (%)		1.58	1.96	2.08	3.80	3.22	1.94

[¶]Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$). **= ($p \leq 0.01$). DMSH_{0.05}= diferencia mínima significativa honesta.

La interacción positiva del Si con la mayoría de los nutrientes aún no es clara, pero se ha demostrado que la adición de este elemento benéfico favorece la absorción y distribución de estos, ya sea por cambios en las propiedades químicas del suelo o sustrato, por la regulación positiva de los genes transportadores de cada mineral o por la estimulación de la actividad de H⁺-ATPasa (Pavlovic *et al.*, 2021). Sin embargo, el efecto sinérgico del Si con los nutrientes esenciales depende del tipo de suelo o sustrato, las condiciones ambientales en las que se desarrolla la planta, así como la fuente, dosis y vía de aplicación del Si (Hu *et al.*, 2020).

Concentración de micronutrientes en las hojas

El análisis de varianza mostró que la vía de aplicación, dosis de Si y la interacción de V * D provocaron cambios altamente significativos en la concentración de todos los micronutrientes en hojas, a excepción del Mo, donde la dosis de silicio aplicada fue no significativa (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6. Significancia estadística de la concentración de micronutrientos en las hojas de pepino cultivado en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.

Factor	Fe	Zn	Mn	Cu	B	Mo
V	**	**	**	**	**	**
D	**	**	**	**	**	NS
V*D	**	**	**	**	**	**

**= altamente significativo ($p \leq 0.01$), NS= no significativo ($p > 0.05$). V= vía de aplicación, D= dosis de silicio.

La concentración de micronutrientos en hojas de pepino estuvo dentro del rango de suficiencia a excepción del molibdeno que presentó niveles por encima del suficiente (Alcántar-González *et al.*, 2016). La aspersion foliar de 500 mg de Si generó la mayor concentración de metales pesados en hojas (Fe, Zn, Mn y Cu), con valores significativamente superiores al testigo en 61.5, 13.7, 56.2 y 59.1 %. En cambio, el más alto contenido de B se obtuvo con la dosis de 1500 mg vía foliar (16.7 % superior al testigo), al igual que el Mo, pero en ambas vías de aplicación con incrementos de 4.8 % vía raíz y 3 % vía foliar. Se observó que al aplicar 1000 mg de Si de forma foliar se disminuye el contenido de Fe y en ambas vías de aplicación el Zn y Cu, pero el Cu también se ve afectado por el suministro de 1500 mg vía foliar (Cuadro 4.7).

Cuadro 4.7. Concentración de micronutrientos en hojas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.

Aplicación	Silicio (mg L ⁻¹)	Fe	Zn	Mn	Cu	B	Mo
		(ppm)					
Raíz	500	271.3 b [†]	67.4 c	215.6 b	17.19 c	104.1 c	3.14 ab
	1000	246.3 c	59.9 d	187.3 d	15.53 d	106.9 b	3.25 a
	1500	223.3 e	68.3 c	181.4 e	18.90 b	91.8 g	3.11 abc
Foliar	500	342.3 a	77.4 a	258.3 a	27.48 a	95.3 e	2.91 bc
	1000	205.4 g	58.8 d	165.0 f	15.43 d	101.4 d	2.89 c
	1500	242.7 d	72.3 b	193.1 c	15.24 d	109.1 a	3.19 a
	Testigo	212.0 f	68.1 c	165.4 f	17.27 c	93.5 f	3.10 abc
Probabilidad de F		**	**	**	**	**	**
DMSH _{0.05}		2.08	2.14	1.87	0.59	1.52	0.24
Coeficiente de variación (%)		0.30	1.13	0.34	1.17	0.54	2.83

[†]Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$). **= ($p \leq 0.01$). DMSH_{0.05}= diferencia mínima significativa honesta.

Lo anterior se relaciona con la capacidad del Si para mitigar el estrés por metales pesados ya que reduce su absorción cuando este elemento benéfico se encuentra en concentraciones suficientes en el sustrato o en la planta (De Olivera *et al.*, 2023). Lo anterior es debido a que existen varios mecanismos involucrados, entre ellos la reducción de la absorción de metales pesados por la formación de barreras físicas, por la acumulación de SiO₂, lo que restringe su transferencia de la raíz a los tallos o de los tallos a las hojas (Khan *et al.*, 2021) y la formación de complejos con metales pesados (metal-silicato) que reduce la biodisponibilidad de estos micronutrientes (Emamverdian *et al.*, 2018).

En el cultivo de pepino se ha reportado que la aplicación exógena de Si reduce significativamente la concentración de cobre en raíces y hojas (Bosnic *et al.*, 2019). En arroz se ha demostrado que las aplicaciones de Si reducen las concentraciones de metales pesados en hojas y granos (Gaur *et al.*, 2020).

Variables de rendimiento y calidad de los frutos

Rendimiento y sus componentes

El rendimiento y número de frutos por planta, así como el peso medio de los frutos mostraron cambios altamente significativos por efecto de la dosis de Si aplicada. En cambio, la vía de aplicación y la interacción de V * D no generaron cambios en ninguna de las variables evaluadas (Cuadro 4.8).

Cuadro 4.8. Significancia estadística del rendimiento y sus componentes del cultivo de pepino producido en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.

Factor	RFP	NFP	PMF	LF	DF
V	NS	NS	NS	NS	NS
D	**	**	**	NS	NS
V*D	NS	NS	NS	NS	NS

**= altamente significativo ($p \leq 0.01$), NS= no significativo ($p > 0.05$). V= vía de aplicación, D= dosis de silicio. RFP= rendimiento de frutos por planta. NFP= número de frutos por planta. PMF= peso medio de frutos. LF= longitud de frutos. DF= diámetro de frutos.

La prueba complementaria de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) mostró que la aplicación foliar de Si a 1500 mg generó el más alto rendimiento (5.08 kg / planta), seguido de la misma dosis suministrada a la raíz (4.80 kg / planta); estos rendimientos superaron al

obtenido en las plantas testigo en 43.9 y 36 %, respectivamente. Sin embargo, también se observó que al aplicar 1000 mg de Si de forma foliar se logra incrementar el rendimiento en 33 % comparado con el testigo (Figura 4.11). En cambio, la dosis de 1000 mg aplicada a la raíz y las dosis más baja (500 mg) generaron rendimientos estadísticamente iguales al testigo. Ninguna de las combinaciones modificó el peso medio, la longitud y el diámetro de los frutos, lo que indica que a pesar de que las plantas que recibieron dosis altas de Si produjeron mayor número de frutos (hasta cinco más que el testigo) no redujeron la calidad de estos, ya que generalmente, las plantas con alto nivel de cuaje generan frutos pequeños y ligeros por la falta de distribución de fotoasimilados y nutrientes (León-Burgos *et al.*, 2021).

Los incrementos anteriores son debidos a que las plantas que recibieron estos mismos tratamientos produjeron una cantidad de frutos significativamente superiores a las plantas que no recibieron aplicación de Si (Cuadro 4.9). Esto se asocia a lo publicado por Pavlovic *et al.* (2021) quienes señalan que el Si favorece la absorción y acumulación de elementos como el K, Ca, Mg, B y Mo, que determinan la producción y el desarrollo de los frutos, lo que se pudo observar en el Cuadro 4.5 y 4.7 de este estudio.

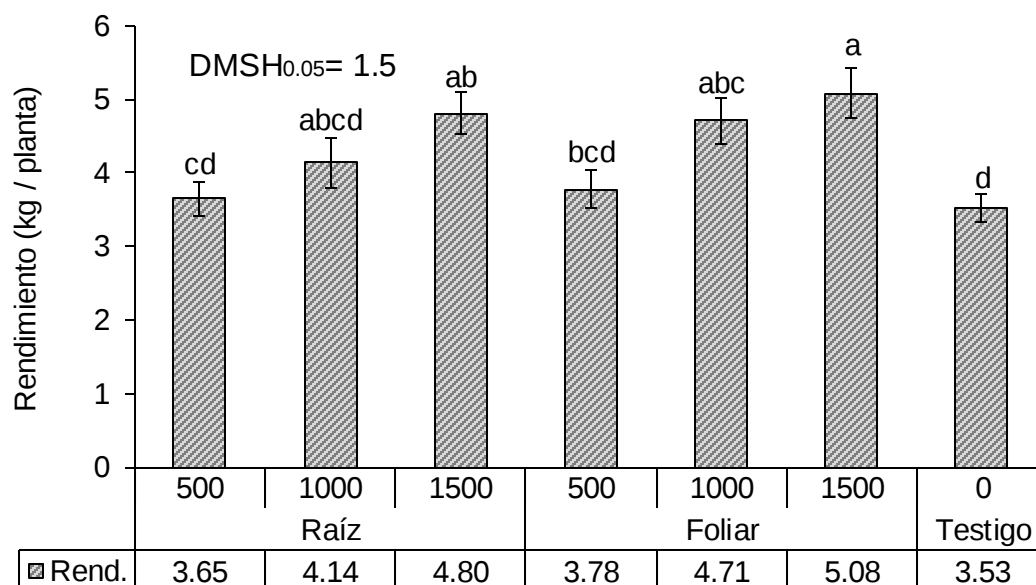


Figura 4.11. Rendimiento de pepino producido en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio. $DMSH_{0.05} =$ diferencia mínima significativa honesta al 5 % de probabilidad del error.

Cuadro 4.9. Prueba de comparación de medias del rendimiento y sus componentes del cultivo de pepino producido en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.

Vía de aplicación	Silicio (mg L ⁻¹)	Frutos por planta	Peso medio (g)	Diámetro (mm)	Longitud (cm)
Raíz	500	12.67 c [¶]	287.38 a	48.31 a	22.91 a
	1000	13.40 bc	308.81 a	48.37 a	22.64 a
	1500	13.80 ab	347.98 a	48.90 a	22.93 a
Foliar	500	12.60 c	299.05 a	48.44 a	22.86 a
	1000	14.40 ab	326.01a	49.50 a	23.10 a
	1500	17.06 a	337.95 a	49.41 a	23.47 a
	Testigo	12.53 c	281.85 a	47.63 a	22.71 a
Probabilidad de F		**	ns	ns	ns
DMSH _{0.05}		1.2	68.65	2.59	0.99
Coeficiente de variación (%)		5.98	10.94	2.66	2.15

[¶]Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$). **= ($p \leq 0.01$); ns= no significativo ($p \geq 0.05$). DMSH_{0.05}= diferencia mínima significativa honesta.

Aunado a lo anterior, el rendimiento está estrechamente relacionado con la producción de materia seca del cultivo, y el Si facilita el transporte de fotoasimilados de los órganos vegetativos de la planta a los órganos reproductivos (Etesami y Riong, 2020) por lo tanto, a mayor producción de materia seca, más altos serán los rendimientos; eventos que se observaron es esta investigación.

Por otra parte, el Si también ayuda a mitigar el estrés por altas temperaturas (Shilpha *et al.*, 2023), lo cual sucedió en esta investigación, ya que en las fases críticas para el rendimiento (floración y fructificación) se presentaron temperaturas máximas de entre 39.2 y 41.8 °C (Figura 4.1); por lo tanto, las plantas que se desarrollan con niveles bajos de estrés tienden a incrementar el rendimiento de frutos. Adicionalmente, cuando se aplica como fuente de Si la tierra de diatomeas en dosis altas se forma sobre el dosel de las plantas una capa ligeramente blanquecina que ayuda a reflejar la radiación solar y disminuir la temperatura de las plantas.

Es importante mencionar que la eficiencia del Si fue similar cuando se aplicó directamente a la raíz que de forma foliar, ya que se ha mencionado que, en comparación con la fertilización al suelo, la aspersión foliar de este mineral es más eficiente (Hu *et al.*, 2022). Sin embargo, los sustratos prácticamente inertes como el

tezontle poseen características físicas y químicas muy distintas a un suelo y esto puede favorecer la movilización y absorción del Si.

Calidad de los frutos

La dosis de Si generó cambios altamente significativos en la firmeza y el pH de los frutos. La vía de aplicación y la interacción entre factores no presentaron modificaciones estadísticas en la calidad de los frutos (Cuadro 4.10).

Cuadro 4.10. Significancia estadística de la calidad de los frutos de pepino cultivados en tezontle, en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.

Factor	Firmeza	Sólidos solubles	pH	Acidez titulable
V	NS	NS	NS	NS
D	**	NS	**	NS
V*D	NS	NS	NS	NS

**= altamente significativo ($p \leq 0.01$), NS= no significativo ($p > 0.05$). V= vía de aplicación, D= dosis de silicio.

La firmeza de los frutos osciló entre 5.74 y 6.26 kg cm⁻² y se observó un incremento de esta conforme se aumentó la dosis de Si. La mayoría de las combinaciones evaluadas, a excepción de la dosis más baja (500 mg) en ambas vías de aplicación incrementaron la firmeza en comparación con el testigo, sin embargo, la prueba complementaria de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) indicó que los frutos con mayor firmeza fueron aquellos cosechados de las plantas que recibieron 1500 mg de Si en ambas vías de aplicación (Cuadro 4.11), con incrementos de 20 % vía raíz y 19 % con la aplicación foliar en comparación a las plantas del testigo. Al respecto, Cázarez-Flores *et al.* (2024) señalan que el Si aplicado vía drench (20 mg L⁻¹) aumenta la firmeza de los frutos de pepino en 13.4 %. Esto puede explicarse porque el Si al acumularse en la pared celular del tejido vegetal se une a compuestos como la celulosa, la hemicelulosa y las pectinas, lo que le proporciona rigidez y estabilidad y mejora la resistencia mecánica (Singh *et al.*, 2023). Además, en el Cuadro 4.5 se observa que la combinación de las dos vías de aplicación y la dosis de 1500 mg favoreció la acumulación de Ca en hojas, y este elemento es de los más importantes para el fortalecimiento de las paredes celulares al formar enlaces cruzados de pectinas de Ca (Gawkowska *et al.*, 2018), que junto con el Si incrementaron la firmeza de los frutos.

Cuadro 4.11. Prueba de comparación de medias de las variables de calidad de frutos de pepino producidos en tezontle en función de la vía de aplicación y dosis de silicio.

Vía de aplicación	Silicio (mg L ⁻¹)	Firmeza (kg cm ⁻²)	Sólidos solubles (°Brix)	pH	AT (%)
Raíz	500	5.96 bc	4.77 a	6.23 ab	0.304 a
	1000	6.24 ab	4.52 a	6.31 ab	0.304 a
	1500	6.29 a	4.59 a	6.54 a	0.272 a
Foliar	500	5.92 bc	5.17 a	6.16 b	0.352 a
	1000	6.17 ab	5.01 a	6.33 ab	0.301 a
	1500	6.28 a	4.60 a	6.36 ab	0.291 a
	Testigo	5.74 c	4.58 a	6.23 ab	0.323 a
Probabilidad de F		**	ns	*	ns
DMSH _{0.05}		0.33	1.6	0.34	0.10
Coeficiente de variación (%)		2.71	16.41	2.70	16.45

†Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$). * = ($p \leq 0.05$); ** = ($p \leq 0.01$); ns = no significativo ($p \geq 0.05$). DMSH_{0.05} = diferencia mínima significativa honesta.

Cabe resaltar que mejorar esta característica física incrementa la vida de anaquel de los frutos de pepino. Esto es importante porque el ablandamiento de frutos por daños mecánicos, de transporte y por la pérdida de agua y la descomposición de moléculas orgánicas son las principales causas de pérdidas en postcosecha (González-García *et al.*, 2022).

Los valores de pH de los frutos oscilaron entre 6.16 y 6.54, considerados como neutros (FAO, 2000). La dosis más alta de Si (1500 mg) generó el valor más sobresaliente en este parámetro, pero solo cuando fue aplicado a la raíz, en contraparte, los frutos que recibieron la aspersión foliar de 500 mg de Si mostraron el pH más bajo, incluso menor que el testigo (Cuadro 4.11). Los valores de pH que se obtuvieron en este estudio son relativamente superiores a los reportados en otras investigaciones con aplicaciones foliares de Si en pepino (González-Terán, *et al.*, 2020; González-García *et al.*, 2022; Cázarez-Flores *et al.*, 2024) donde se alcanzaron medias de 5.2 a 5.7. Aumentar el pH de los frutos resulta beneficioso para la salud humana, ya que se ha demostrado que consumir pulpa de pepino con pH neutros o cercano a la neutralidad puede actuar contra la acidez estomacal, tiene un buen potencial carminativo y antiácido (Chakraborty y Rayalu, 2021). Además, los expertos en salud recomiendan una ingesta de 75 % alimentos alcalinos y 25 % alimentos ácidos para mantener un nivel adecuado del pH en la sangre (entre 7.35 y 7.45) (Hopkins *et al.*, 2022). Los sólidos

solubles totales y acidez titulable no presentaron modificaciones estadísticas por efecto de las combinaciones de la vía de aplicación con la dosis de Si (Cuadro 4.11).

Esta investigación muestra que la aplicación de Si tanto a la raíz como vía foliar mejora el crecimiento de las plantas de pepino, el rendimiento, la calidad de los frutos y la concentración nutrimental en las hojas. De forma general, las dosis de 1000 y 1500 mg generaron los resultados más sobresalientes en las variables morfológicas de las plantas, los rendimientos más altos y favorecieron la calidad de los frutos en términos de firmeza. Sin embargo, solo la dosis más alta (1500 mg) aplicada a la raíz aumentó el pH de los frutos y esta misma fue la que generó el más alto contenido de macronutrientes en hojas cuando se aplicó en ambas vías. Por lo tanto, en el cultivo de pepino producido en tezontle, la dosis de 1500 mg de Si fue la más eficiente y puede aplicarse de forma foliar o incluirla en la solución nutritiva para suministrarse directamente a la raíz.

Análisis de correlación de Pearson

El análisis de correlación mostró asociaciones positivas y significativas ($p \leq 0.05$) entre las variables morfológicas, fisiológicas, de rendimiento y calidad de los frutos (Cuadros 7.11 a 7.13 del apéndice). La longitud del tallo y el número de hojas tuvo una correlación directa con el contenido de nitrógeno, potasio y molibdeno en las hojas; el diámetro del tallo con el contenido de fósforo ($r = 0.44$; $p \leq 0.01$) y potasio ($r = 0.52$; $p \leq 0.01$), y el área foliar únicamente con el nitrógeno ($r = 0.82$; $p \leq 0.01$). En cambio, la producción de materia seca total se asoció de forma estadísticamente positiva con el contenido de potasio, magnesio y azufre en las hojas y de forma negativa con el contenido de hierro, zinc y manganeso (Cuadro 7.12). Lo anterior indica que los elementos más imprescindibles en el crecimiento vegetativo de las plantas de pepino fueron el nitrógeno, fósforo y potasio y que algunos micronutrientes pueden tener efectos negativos en el desarrollo del cultivo si se aplican en exceso (Saleem *et al.*, 2023), tal como lo reflejó este análisis.

En este estudio se demostró que algunas variables morfológicas están estrechamente relacionadas con el rendimiento, debido a que, la longitud y el diámetro del tallo, el área foliar y la acumulación de materia seca de la raíz correlacionaron de forma

positiva y significativa con el rendimiento del cultivo, mismo que también se asoció directamente con el número de frutos por planta ($r= 0.81$; $p\leq 0.01$) y la acumulación de potasio en las hojas ($r= 0.49$; $p\leq 0.01$), lo que concuerda con las correlaciones entre crecimiento y rendimiento en trigo publicadas por (Franklin *et al.*, 2017). La producción de materia seca total, el área foliar y la clorofila de las hojas presentó una asociación positiva con la producción de frutos por planta y la firmeza de los frutos (Cuadro 7.11); esta última también correlacionó con la concentración de calcio en las hojas ($r= 0.72$; $p\leq 0.01$) y el pH de los frutos ($r= 0.63$; $p\leq 0.01$). El análisis también indicó que existió una relación directa entre la concentración de Mg en las hojas y el contenido de clorofila de las hojas ($r= 0.42$; $p\leq 0.01$) (Cuadro 7.12), lo que se relaciona con el papel del magnesio como componente integral de la clorofila (Ahmed *et al.*, 2023).

Los sólidos solubles totales mostraron una asociación positiva y altamente significativa con el contenido de potasio ($r= 0.43$) y molibdeno ($r= 0.68$) en las hojas, y con la acidez titulable ($r= 0.46$), esto se explica por el papel del potasio en la translocación de azúcares desde los órganos fuente a los órganos sumidero (Ho *et al.*, 2020). La acidez titulable también se correlacionó con la concentración de Fe en las hojas ($r= 0.34$; $p\leq 0.05$). Las mayores asociaciones positivas entre los nutrientes en las hojas fueron las del nitrógeno con el calcio y el magnesio ($r= 0.73$ y 0.60 , respectivamente); el potasio con el azufre ($r= 0.77$) y molibdeno ($r= 0.53$); el calcio con el magnesio ($r=0.91$); el hierro con el zinc ($r= 0.73$), el manganeso ($r= 0.99$) y el cobre ($r=0.84$); el zinc con el manganeso ($r= 0.76$); el cobre con el zinc y el manganeso ($r= 0.80$ y 0.84 , respectivamente). En cambio, las mayores asociaciones negativas se dieron entre el fósforo y el boro ($r= -0.79$); el potasio con el hierro ($r= -0.55$); el azufre con el cobre ($r= -0.56$) y el cobre con el boro ($r= -0.56$) (Cuadro 7.13). La interacción entre los nutrientes resalta la importancia de la aplicación balanceada de estos mediante soluciones nutritivas en sustratos, dado que existen sinergismos y antagonismos, por lo que el exceso o deficiencia de algún nutriente no solo afectará el rendimiento por el desbalance de sí mismo, sino que también limitará la absorción, el transporte o la asimilación de otros nutrientes (Kumar *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

- La aplicación de 1500 mg de silicio vía foliar generó la mayor longitud del tallo y producción de materia seca. En cambio, la dosis de 1000 mg aplicada a la raíz generó el mayor número de hojas. El diámetro del tallo, el área foliar y la clorofila de las hojas fueron más sobresalientes con la aplicación de 1000 y 1500 mg en ambas vías.
- La dosis de 1500 mg aplicada vía foliar incrementó la concentración de N, P, K, Ca, Mg y Mo en las hojas, y aplicada a la raíz aumentó el contenido de Ca, Mg, S, B y Mo. En cambio, al aplicar 500 mg de Si de forma foliar se aumentó el contenido de metales pesados (Fe, Zn, Mn y Cu) pero disminuyeron con las dosis de 1000 y 1500 mg indistintamente de la forma de aplicación.
- El silicio a las dosis de 1500 mg indistintamente de la vía de aplicación y de 1000 mg aplicada vía foliar fueron las que generaron el mayor rendimiento y número de frutos por planta.
- En los frutos, la mayor firmeza se obtuvo con la aplicación de 1000 y 1500 mg de silicio en ambas vías, y el más alto valor de pH con 1500 mg vía raíz.
- La aplicación de silicio mejora el crecimiento, la producción y calidad de frutos de pepino y la dosis más apropiada es 1500 mg suministrada a la raíz o foliar.

LITERATURA CITADA

- Abdelaal, A. A. K.; Mazru, S. A. Y. and Hafez, M. Y. 2020. Silicon foliar application mitigates salt stress in sweet pepper plants by enhancing water status, photosynthesis, antioxidant enzyme activity and fruit yield. *Plants*. 9(6):1-15. <https://doi.org/10.3390/plants9060733>.
- Abdelhafez, A. A.; Abbas, H. H. M.; Metwally, M. S.; Abbas, H. H.; Metwally, A. S.; Ibrahim, M. K.; Metwally, S. A.; Mansour, R. M. R. and Zhang, X. 2024. Introductory chapter: climate change and climate-smart greenhouses. In: *Climate smart greenhouses- innovations and impacts*. (pp. 3-20). A. A. Abdelhafez. and M. H. H. Abbas (Eds.). IntechOpen.
- Ahmed, M.; Qadeer, U.; Ahmed, Z.I.; Hassan, F. U. 2016. Improvement of wheat (*Triticum aestivum*) drought tolerance by seed priming with silicon. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 62(3):299-315. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1048235>.
- Ahmed, N.; Zhang, B.; Bozdar, B.; Chachar, S.; Rai, M.; Li, J.; Li, Y.; Hayat, F.; Chachar, Z. and Tu, P. 2023. The power of magnesium: unlocking the potential for increased yield, quality, and stress tolerance of horticultural crops. *Frontiers in Plant Science*. 14:1285512. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1285512>.
- Alcántar-Gozález, G.; Trejo-Téllez, L. I.; Fernández-Pavía, L. y Rodríguez-Mendoza, M. N. 2016. Elementos esenciales. En: *Nutrición de los cultivos*. 2^{da} edición. (pp. 23-55). G. Alcántar-Gozález; L. I. Trejo-Téllez. y F. C. Gómez-Merino. (Eds.). Biblioteca Básica de Agricultura. México.
- Alkarim, A. E.; Bayoumi, Y.; Metwally, E. and Rakha, M. 2017. Silicon supplements affect yield and fruit quality of cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in net houses. *African Journal of Agricultural Research* 12(31):2518-2523.
- Amico, D, A.; De Boni, A.; Ottomano, P. G.; Acciani, C. and Roma, R. 2023. Environmental analysis of soilless tomato production in a high-tech greenhouse. *Cleaner Environmental Systems*. 11(1):1-10.

- Arnon, D. I. and Stout, P. R. 1939. Experimental methods for the study of the role of copper, manganese, and zinc in the nutrition of higher plants. *American Journal of Botany*. 26:144-149.
- Association of Official Analytical Chemists, International (AOAC). 1980. *Official Methods of Analysis of AOAC*. Washington, D. C. USA. 1018 p.
- Badgery, P. J.; James, L.; Parks, S.; Tesoriero, L.; Ryland, A.; Ekman, J. and Jarvis, J. 2019. Greenhouse cucumber production. New South Wales Department of Planning, Industry and Environment. 226 p.
- Basirat, M. and Mousavi, S. M. 2022. Effect of foliar application of silicon and salicylic acid on regulation of yield and nutritional responses of greenhouse cucumber under high temperature. *Journal of Plant Growth Regulation*. 41(5):1-10. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10562-5>.
- Benko, B.; Fabek, U. S.; Radman, S. and Nevena, O. 2023. Hydroponic production systems in greenhouses. *In: Climate smart greenhouses*. A. A. Ahmed and A. Mohamed (Eds.), Chapter 2. IntechOpen.
- Bhat, J. A.; Shivaraj, S. M.; Singh, P.; Navadagi, D. B.; Tripathi, D. K.; Dash, P. K.; Solanke, A. U.; Sonah, H. and Deshmukh, R. 2019. Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants. *Plants*. 8(3):1-20. <https://doi.org/10.3390/plants8030071>.
- Bosnic, D.; Nikolic, D.; Timotijevic, G.; Pavlovic, J.; Vaculik, M.; Samardzic, J. and Nikolic, M. 2019. Silicon alleviates copper (Cu) toxicity in cucumber by increased Cu-binding capacity. *Plant and Soil*. 441:629-641.
- Bu, R.; Zhang, H.; Zhang, S.; Wang, L.; Peng, C.; Zhao, X.; Zhang, X. and Xie, J. 2024. Silicon alleviates autotoxicity by regulating membrane lipid peroxidation and improving photosynthetic efficiency in cucumber seedlings (*Cucumis sativus* L.). *Scientia Horticulturae*. 325:112692.

- Cai, Y.; Pan, B.; Liu, B.; Cai, K.; Tian, J. and Wang, W. 2022. The Cd sequestration effects of rice roots affected by different Si management in Cd-contaminated paddy soil. *Science of The Total Environment*. 849: 157718. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157718>.
- Carlile, W. R.; Cattivello, C. and Zaccheo, P. 2015. Organic growing media: constituents and properties. *Vadose Zone Journal*. 14(6):1-13.
- Carotti, L.; Pistillo, A.; Zauli, I.; Meneghello, D.; Martin, M.; Pennisi, G.; Gianquinto, G. and Orsini, F. 2023. Improving water use efficiency in vertical farming: Effects of growing systems, far-red radiation and planting density on lettuce cultivation. *Agricultural Water Management*. 285:1-10.
- Castro, A. J.; López-Rodríguez, M. D.; Giagnocavo, C.; Gimenez, M.; Céspedes, L.; La Calle, A.; Gallardo, M.; Pumares, P.; Cabello, J.; Rodríguez, E.; Uclés, D.; Parra, S.; Casas, J.; Rodríguez, F.; Fernandez-Prado, J. S.; Alba-Patiño, D.; Expósito granados, M.; Murillo-López, B. E.; Vasques, L. M. and Velera, D. L. 2019. Six Collective Challenges for Sustainability of Almería Greenhouse Horticulture. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 16(21):1-23.
- Cázarez-Flores, L.; Partida-Ruvalcaba, L.; Velázquez-Alcaraz, T. J.; Zazueta-Torres, N. D.; Yáñez-Juárez, M. G.; Angulo-Castro, A. y Díaz-Valdés, T. 2024. Respuesta de dos variedades de pepino (*Cucumis sativus* L.) al Silicio y Cloro aplicados en casa sombra. *Terra Latinoamericana*. 42:1-9. <https://orcid.org/0000-0002-8285-0601>.
- Chakraborty, S. and Rayalu, S. 2021. Health beneficial effects of cucumber. In: *Cucumber economic values and its cultivation and breeding*, (pp.75-84). H. Wang (Ed.). IntechOpen.
- Chattopadhyay, S.; Roy, P. and Mandal, D. 2023. A Review on *Cucumis sativus* L. and its Anti-Ulcer Activity. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*. 2(1):201-203.

- Chen, D.; Cao, B.; Qi, L.; Yin, L.; Wang, S.; Deng, X. 2016. Silicon-moderated K-deficiency-induced leaf chlorosis by decreasing putrescine accumulation in sorghum. *Annals of Botany*. 118(2): 305-315. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw111>.
- Cui, J.; Song, S.; Yu, J. and Liu, H. 2021. Effect of daily light integral on cucumber plug seedlings in artificial light plant Factory. *Horticulturae*. 7(6):1-14. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7060139>.
- De Olivera, A. L.; Rodríguez, C. F. J.; Da Silva, L. D.; Abreu-Junior, C. H. and De Mello, P. R. 2023. Silicon mitigates the effects of potentially toxic metals. In: *Benefits of silicon in the nutrition of plants*, (pp.237-251). R. P. De Mello (Ed.). Springer Cham.
- Domaratskyi, Y. 2021. Leaf area formation and photosynthetic activity of sunflower plants depending on fertilizers and growth regulators. *Journal of Ecological Engineering*. 22(6):99-105. <https://doi.org/10.12911/22998993/137361>.
- Dorais, M. and Thériault, M. 2018. Beneficial effects of using silicon for organic greenhouse cucumber. *Acta Horticulturae*. 1227:443-448. Doi: 10.17660/ActaHortic.2018.1227.55.
- Duo, Z.; Feng, H.; Zhang, H.; Elsayed, A. A.; Zhang, F.; Li, Z. and Fan, J. 2023. Silicon application mitigated the adverse effects of salt stress and deficit irrigation on drip-irrigated greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*. 289(1):1-12.
- Emamverdian, A.; Ding, Y.; Xie, Y. and Sangari, S. 2018. Silicon mechanisms to ameliorate heavy metal stress in plants. *BioMed Research International*. 2018:1-10. <https://doi.org/10.1155/2018/8492898>.
- Etesami H. and Ryong, J. B. 2020. Chapter 19 - Importance of silicon in fruit nutrition: Agronomic and physiological implications. *In: Fruit crops: diagnosis and management of nutrient constraints*, (pp.255-277). A. K. Srivastava and C. Xiaohu (Eds.). Elsevier. Filadelfia, USA.

- Faroutine, G.; Arteaga-Ramírez, R.; Pineda-Pineda, J. and Vázquez-Peña, M. A. 2023. Effect of calcium silicate and moisture content of the substrate on the growth and productivity parameters of cucumber. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 83(3):334-346. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392023000300334>.
- Fernández, V. and Brown, H. P. 2013. From plant surface to plant metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrients. *Frontiers in Plant Science*. 4:1-5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00289>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2000. Codex Alimentarius Commission: Joint Fao/Who Food Standards Programme. 29 p.
- Franklin, S.; Marza, F.; Butrón, R. y Quispe, F. 2017. Correlación y coeficientes de sendero para variables agronómicas y componentes de rendimiento de trigo harinero. *Revista Científica de Investigación*. 1(6):54-60.
- Frazão, J. J.; Prado, R. D.; De Souza, J. J. P. and Rossatto, D. R. 2020. Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. *Scientific Reports*. 10:1-10.
- García, E. 2005. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México.
- Gawkowska, D.; Cybulska, J. and Zdunek, A. 2018. Structure-related gelling of pectins and linking with other natural compounds: a review. *Polymers*. 10(7):1-25. <https://doi.org/10.3390/polym10070762>.
- González, C. L.; Mello, P. R. y Silva, C. C. N. 2015. El silicio en la resistencia de los cultivos a las plagas agrícolas. *Cultivos Tropicales*. 36(Núm. especial):16-24.
- González-García, Y.; Flores-Robles, V.; Cadenas-Pliego, G.; Benavides-Mendoza, A.; De La Fuente, C. M.; Sandoval-Rangel, A. and Juárez-Maldonado, A. 2022. Application of two forms of silicon and their impact on the postharvest and the content of bioactive compounds in cucumber (*Cucumis sativus* L.) fruits. *BIOCELL*. (11):2497-2506.

- González-Terán Ouellette, G. E.; Gómez-Merino, F. C. and Trejo-Téllez, L. 2020. Effects of silicon and calcium application on growth, yield and fruit quality parameters of cucumber established in a sodic soil. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus*. 19(3):149-158.
- Gou, T.; Yang, L.; Hu, W.; Chen, X.; Zhu, Y.; Guo, J. and Gong, H. 2020. Silicon improves the growth of cucumber under excess nitrate stress by enhancing nitrogen assimilation and chlorophyll synthesis. *Plant Physiology and Biochemistry*. 152:53-61. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.031>.
- Gouranga, S.; Nagdev, P.; Jeer, M. and Murali-Baskaran. 2023. Silica nanoparticles mediated insect pest management. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 194(1):1-10.
- Gruda, N.; Caron, J.; Prasad, M.; Maher, M. J. 2017. Growing media. In: *Encyclopedia of Soil Sciences*. R. Lan (Ed.), pp 1053-1058. 3rd ed. CRC Press Taylor & Francis Group. USA.
- Gruda, S. N. 2019. Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy*. 9(6):1-24.
- Hanif, M. Y.; Mir, S.; Ganie, A. M.; Manzoor, S. A.; Majeed, U.; Chesti, M.; Mansoor, M.; Irshad, I.; Javed, A.; Sadiq, S. and Jeelani, W. F. 2022. Soilless farming: An innovative sustainable approach in agricultura. *The Pharma Innovation Journal*. 11(6): 2663-2675.
- Hao, Q.; Yang, S.; Song, Z.; Li, Z.; Ding, F.; Yu, C.; Hu, G. and Liu, H. 2020. Silicon affects plant stoichiometry and accumulation of C, N, and P in grasslands. *Frontiers in Plant Science*. 11:1-10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01304>.
- Hettiarachchi, M. H. S. M.; Wijayasinghe, K. D. B. V. and Weerakkody, W. A. P. 2024. Greenhouse cucumber production in the humid tropics. In: D. Z. Ahmed. And R. Bhat (Eds.). *Advanced research and review in horticultural sciences*. (pp.113-136). Publisher: Bright Sky Publications.

- Hopkins, E.; Sanvictores, T. and Sharma, S. 2022. Physiology, acid base balance. In: StatPearls (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK507807/>). StatPearls Publishing.
- Ho, L. H.; Rode, R.; Siegel, M.; Reinhardt, F.; Yvin, J. C.; Pluchon, S.; Hosseini, A. S. and Pommerrenig, B. 2020. Potassium application boosts photosynthesis and sorbitol biosynthesis and accelerates cold acclimation of common plantain (*Plantago major* L.). *Plants*. 9(10):1259. <https://doi.org/10.3390/plants9101259>.
- Hou, L.; Ji, S.; Zhang, Y.; Wu, X.; Zhang, L. and Liu, P. 2023. The mechanism of silicon on alleviating cadmium toxicity in plants: A review. *Frontiers in Plant Science*. 14:1-16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1141138>.
- Hu, W.; Su, Y.; Zhou, J.; Zhu, H.; Guo, J.; Huo, H. and Gong, H. 2021. Foliar application of silicon and selenium improves the growth, yield and quality characteristics of cucumber in field conditions. *Scientia Horticulturae*. 294:110776. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110776>.
- Hu, Y. A.; Xu, N. S.; Qin, N. D.; Li, W. and Zhao, Q. X. 2020. Role of silicon in mediating phosphorus imbalance in plants. *Plants*. 10(1):1-14. <https://doi.org/10.3390/plants10010051>.
- Irfan, M.; Aamer, M. M.; Rehman, H.; Mahboob, W.; Sarwar, N.; Abdul, H. O.; Hussein, S.; Ercisli, S.; Akhtar, M. and Aziz, T. 2023. Silicon nutrition in plants under water-deficit conditions: overview and prospects. *Water*. 15(4):1-20. <https://doi.org/10.3390/w15040739>.
- Islam, W.; Tayyab, M.; Khalil, F.; Hua, Z.; Huang, Z. and Chen, Y. H. H. 2020. Silicon-mediated plant defense against pathogens and insect pests. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 168:104641. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104641>.
- Jesús, E.; Fátima, R.; Guerrero, A.; Araújo, J. and Brito, M. 2018. Growth and gas exchanges of arugula plants under silicon fertilization and water restriction. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 22(2):119-124. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p119-124>.

- Jia, H. and Wang, H. 2021. Introductory Chapter: Studies on Cucumber. *In: Cucumber Economic Values and Its Cultivation and Breeding*. H. Wang (Ed.), pp 1-8. IntechOpen.
- Jones, B. J. 2015. Systems of hydroponic culture. *In: Complete guide for growing plants hydroponically*. pp 99-114. CRC press Taylor & Francis Group. USA. 206 p.
- Kalaivanan, D.; Selvakumar, G. and Carolin, R. A. 2022. Soilless cultivation to secure the vegetable demand of urban and peri-urban population. *In: Recent Research and Advances in Soilless Culture*. M. Turan., S. Argin and A. Güneş. (Eds.), Chapter 6. IntechOpen.
- Kalantari, F.; Mohd, T. O.; Akbari, J. R. and Fatemi, E. 2017. Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: a review. *Journal of Landscape Ecology*. 11(1):35-60.
- Karna, M. P. 2022. Evaluating Potential Importance of Cucumber (*Cucumis sativus* L. -Cucurbitaceae): A Brief Review. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*. 10(1):10-15. <https://doi.org/10.3126/ijasbt.v10i1.44152>.
- Kaur, H. and Greger, M. 2019. A review on Si uptake and transport system. *Plants*. 8(4):1-8. <https://doi.org/10.3390/plants8040081>.
- Kaur, S.; Kaur, N.; Siddique, K. H. M. and Nayyar, H. 2016. Beneficial elements for agricultural crops and their functional relevance in defence against stresses. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 62(7):905-920.
- Keller, C.; Rizwan, M.; Davidian, J. C.; Pokrovsky, O. S.; Bovet, N.; Chaurand, P.; Meunier, J. D. 2015. Effect of silicon on wheat seedlings (*Triticum turgidum* L.) grown in hydroponics and exposed to 0 to 30 μ M Cu. *Planta*. 241:847-860.
- Khan, I.; Afzal, A. S.; Rizwan, M.; Ali, S.; Jawad, H. M.; Brestic, M.; Zhang, X. and Huang, L. 2021. Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 222:112510. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112510>.

- Khan, L. A. 2024. Silicon: A valuable soil element for improving plant growth and CO₂ sequestration. *Journal of Advanced Research*. 71:43-54. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2024.05.027>.
- Khan, M. N.; Siddiquib, M. H.; Alhussaen, K. M.; El-Alosey, A. R.; Atallah, M. A. M. and Kalajic, H. M. 2023. Titanium dioxide nanoparticles require K⁺ and hydrogen sulfide to regulate nitrogen and carbohydrate metabolism during adaptive response to drought and nickel stress in cucumber. *Environmental Pollution*. 134(1):1-12.
- Khan, S.; Singh, S.; Kasal, Y.; Singh, S. and Singh, B. 2023. Soilless cultivation-hydroponic techniques: A review. *The Pharma Innovation Journal*. 12(6): 6900-6904.
- Koukounaras, A. 2021. Advanced Greenhouse Horticulture: New Technologies and Cultivation Practices. *Horticulturae*. 7(1):1-5.
- Kumar, S.; Bairwa, D. S.; Kumar, K.; Yavad, R. K. and Yavad, L. P. 2022. Climate regulation in protected structures: areview. *Journal of Agriculture and Ecology*. 13(1):20-30.
- Kumar, S.; Kumar, S. and Mohapatra, T. 2021. Interaction between macro- and micro-nutrients in plants. *Frontiers in Plant Science*. 12:665583. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.665583>.
- Lara, H. A. 2000. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Terra Latinoamericana*. 17(3):221-229.
- Lastockhkina, O.; Aliniaiefard, S.; Seifi, K, M.; Bosacchi, M.; Maslennikova, D. and Lubianova, A. 2022. Novel Approaches for Sustainable Horticultural Crop Production: Advances and Prospects. *Horticulturae*. 8(10):1-45.
- León-Burgos, A. F.; Beltrán, C. G. Y.; Barragán, P. A. L. and Balaguera-López, H. E. 2021. Distribution of photoassimilates in sink organs of plants of Solanaceas, tomato and potato. A review. *Ciencia y Agricultura*. 18(3):79-97. <https://doi.org/10.19053/01228420.v18.n3.2021.13566>.

- Liang, Y.; Nikolic, M.; Bélanger, R.; Gong, H.; and Song, A. 2015. Silicon-mediated tolerance to metal toxicity. In: Silicon in agriculture: from theory to practice. (pp. 83-122). Y. Liang., M. Nikolic., R. Bélanger., H. Gong. and A. Song. (Eds.). Springer, Dordrecht, The Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2>.
- Liu, X.; Huang, Z.; Li, Y.; Xie, W.; Li, W.; Tang, X.; Ashraf, U.; Kong, L.; Wu, L.; Wang, S. and Mo, Z. 2020. Selenium-silicon (Se-Si) induced modulations in physio-biochemical responses, grain yield, quality, aroma formation and lodging in fragrant rice. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 196(1):1-9.
- Lu, Y.; Ma, J.; Teng, Y.; He, J.; Christie, P.; Zhu, L.; Ren, W.; Zhang, M. and Deng, S. 2018. Effect of silicon on growth, physiology, and cadmium translocation of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) in cadmium-contaminated soil. *Pedosphere*. 28(4):680-689. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60417-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60417-X).
- Luyckx, M.; Hausman, J. F.; Lutts, S. and Guerriero, G. 2017. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 8:1-8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00411>.
- Ma, J. F.; Yamaji, N.; Mitani, N.; Xu, X. X.; Su, Y. H.; McGrath, S. P. and Zhao, F. J. 2008. Transporters of arsenite in rice and their role in arsenic accumulation in rice grain. *PNAS*. 105(29):9931-9935.
- Maghsoudi, K.; Emam, Y.; Ashraf, M.; Arvin, M. J. 2019. Alleviation of field water stress in wheat cultivars by using silicon and salicylic acid applied separately or in combination. *Crop and Pasture Science*. 70:36-43. <https://doi.org/10.1071/CP18213>.
- Mandlik, R.; Thakral, V.; Raturi, G.; Shinde, S.; Nikolic, M.; Tripathi, K. D.; Sonah, H. and Deshmukh, R. 2020. Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. *Journal of Experimental Botany*. 71(21):6703-6718. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>.

- Martínez-Rodríguez, O. C.; Can-Chulim, A.; Cruz-Crespo, E. y García-Paredes, J. D. 2017. Influencia del riego y sustrato en el rendimiento y calidad de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8(1):53-65. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i1.71>.
- Matsui, N.; Nakata, K.; Cornelius, C. and Macdonald, M. 2015. Diagnosing maize growth for determination of optimum fertilizer application time in northern Malawi. *Journal of Agricultural Science*. 8(5):50-60.
- Maucieri, C.; Nicoletto, C.; Os, V. E.; Anseeuw, D.; Van, H. R. and Junge, R. 2019. Hydroponic technologies. In: *Aquaponics Food Production Systems*. S. Goddek., A. Joyce., B. Kotzen and G. M. Burnell (Eds.), pp 77-110. SpringerOpen.
- Meselmani, A. A. M. 2021. Nutrient solution for hydroponics. In: *Recent Research and Advances in Soilless Culture*. M. Turan., S. Argin and A. Güneş. (Eds.). Chapter 2, IntechOpen.
- Mills-Ibibofori, T.; Dunn, B.; Maness, N. and Payton, M. 2019. Use of Diatomaceous Earth as a Silica Supplement on Potted Ornamentals. *Horticulturae*. 5(1):1-12.
- Morgan, 2021. Substrate-based hydroponic sistema. In: *Hydroponics and protected cultivation, a practical guide*. pp 77-99. CABI. Inglaterra. 291 p.
- Murillo, C. R. G.; Piedra, M. G. y León, G. R. 2013. Absorción de nutrientes a través de la hoja. *Uniciencia*. 27(1):232-244.
- Nicola, S.; Pignata, G.; Ferrante, A.; Bulgari, R.; Cocetta, G. and Ertani, A. 2020. Water use efficiency in greenhouse systems and its application in horticulture. *Agrolife Scientific Jornal*. 9(1):248-261.
- Ntawuguranayo, S.; Zilberberg, M.; Nashef, K.; Bonfil, J. D.; Kumar, B. N.; Piñera-Chavez, J. F.; Paul, R. M.; Peleg, Z. and Ben-David, R. 2024. Stem traits promote wheat climate-resilience. 15:1388881. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1388881>.

- Osakabe, Y.; Osakabe, K.; Shinozaki, K.; Tran, L. S. P. 2014. Response of to water stress. *Frontiers in Plant Science*. 5:1-8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086>.
- Osuna-Zárate, A. P.; Robledo-Torres, V.; Mendoza-Villarreal, R. and Sandoval-Rangel, A. 2023. Effect of silicon and humic substances on the productivity and absorption of minerals in cucumber. *Agro Productividad*. 16(8):55-66. <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i8.2435>.
- Ouellette, S.; Goyette, M. H.; Labbé, C.; Laur, J.; Gaudreau, L.; Gosselin, A.; Dorais, M.; Deshmukh, K. D. and Bélanger, R. R. 2017. Silicon transporters and effects of silicon amendments in strawberry under high tunnel and field conditions. *Frontiers in Plant Science* 8(949):1-11.
- Pal, A., Adhikary, R., Shankar, T., Sahu, A. K. and Maitra, S. 2020. Cultivation of cucumber in greenhouse. In: S. Maitra, J. Dinkar. and T. Shankar (Eds.). *Protected cultivation and smart agricultura* (pp.139-145). New Delhi Publishers.
- Parimala, M. and Singh, J. 2022. Soil and foliar application of silicon on quality parameters and yield of horticultural crops. *The Pharma Innovation Journal*. 11(5): 427-433.
- Park, G.; Choi, Y.; Jung, J. K.; Shim, E. J.; Kang, M. Y.; Sim, S. C.; Chung, S. M.; Lee, G. P. and Park, Y. 2021. Genetic Diversity Assessment and Cultivar Identification of Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Using the Fluidigm Single Nucleotide Polymorphism Assay. *Plants*. 10(2):1-13.
- Patil, T. S.; Kadam, S. U.; Mane, S. M.; Mahele, M. D. and Dhekale, S. J. 2020. Growth media (substrate): a review. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*. 21(23):106-113.
- Pavlovic J.; Kostic, L.; Bosnic, P.; Kirkby, A. E. and Nikolic, M. 2021. Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. *Frontiers in Plant Science*. 12, 1-19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592>.

- Pontigo S.; Godoy K.; Jiménez H.; Gutiérrez-Moraga A.; Mora M. D. L. L. and Cartes P. 2017. Silicon-mediated alleviation of aluminum toxicity by modulation of al/si uptake and antioxidant performance in ryegrass plants, *Frontiers in Plant Science*. 8(642):1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00642>.
- Preciado-Rangel, P.; Reyes-Pérez, J. J.; Ramírez-Rodríguez, S. C.; Salas-Pérez, L.; Fortis-Hernández, M.; Murillo-Amador, B. and Troyo-Diéguez, E. 2019. Foliar Aspersión of Salicylic Acid Improves Phenolic and Flavonoid Compounds, and Also the Fruit Yield in Cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plants*. 8(2):1-8.
- Pupe, D.; Kaczorek, D. Stein, M. and Schaller, J. 2023. Silicon in plants: alleviation of metal(loid) toxicity and consequential perspectives for phytoremediation. *Plants*. 12(13):1-12. <https://doi.org/10.3390/plants12132407>.
- Qassem, E. R. M.; Bardisi, A.; Nawar, S. A. B. and Ibraheem, K. S. 2022. Effect of some stimulants as foliar application on growth, yield and fruit quality of cucumber under plastic house conditions. *Zagazig Journal of Agricultural Research*. 9:9-22.
- Qassem, M. E. R.; Bardisi, A.; Nawar, A. S. D. and Ibrahem, S. K. H. 2020. Effect of some stimulants as foliar application on growth, yield and fruit quality of cucumber under plastic house conditions. *Zagazig Journal of Agricultural Research*. 49(1):9-22.
- Rajaseger, G.; Lun, C. K.; Yee, T. K.; Ramasamy, S.; Cho, K. M.; Amaladoss, A. and Kadamb, H. P. 2023. Hydroponics: current trends in sustainable crop production. *Bioinformation*. 19(9):925-938.
- Ramírez-Olvera, S. M.; Trejo-Téllez, L. I.; Gómez-Merino, F. C.; Ruíz-Posadas, L. M.; Alcántar-González, E. G. and Saucedo-Veloz, C. 2021. Silicon stimulates plant growth and metabolism in rice plants under conventional and osmotic stress conditions. *Plants*. 10(4):777. <https://doi.org/10.3390/plants10040777>.

- Reyes-Pérez, J. J.; Llerena-Ramos, L. T.; Torres-Rodriguez, J. A.; Hernández-Montiel, L. G.; Macías, P. R. K.; Aragón, S. E. and Palacios-Espinosa, A. 2024. Silicio como bioestimulante en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.). Tropical and Subtropical Agroecosystems. 27(123):1-9.
- Riaz, M.; Kamran, M.; Fahad, S. and Wang, X. 2022. Nano-silicon mediated alleviation of cd toxicity by cell wall adsorption and antioxidant defense system in rice seedlings. Plant Soil. 486:103-117.
- Ríos, J.; Martínez-Ballesta, M.; Ruíz, J. M.; Blasco, B. and Carvajal, M. 2017. Silicon-mediated improvement in plant salinity tolerance: the role of aquaporins. Frontiers in Plant Science. 8:1-10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00948>.
- Salazar-Salazar, W.; Monge-Pérez, J. E. y Loría-Coto, M. 2022. Aplicación foliar de fertilizantes y extracto de algas en pepino (*Cucumis sativus* L.) en invernadero. Avances en Investigación Agropecuaria. 26 (1):177-189.
- Saleem, S.; Mushtaq, N.; Rasool, A.; Hafiz, S. W.; Tahir, I. and Rehman, R. U. 2023. Chapter two - Plant nutrition and soil fertility: physiological and molecular avenues for crop improvement. In: Sustainable Plant Nutrition (pp.23-49). T. Aftab and H. K. Rehman. (Eds.). Academic Press.
- Sandoval-Villa, M., Sánchez-García, P. y Alcantár-González, G. 2016. Principios de la hidroponía y del fertirriego. En: Nutrición de cultivos. G. Alcantár-González, L. Trejo-Téllez y F. Gómez-Merino (Eds.), pp 319-367. Biblioteca Básica de Agricultura. México.
- Santos, M. B.; Vallad, G. and Torrez-Quezada, A. E. 2014. Protected Culture for Vegetable and Small Fruit Crops: Types of Structures. Florida Cooperative Extension Service publication HS1224.
- SAS. 2017. Statistical Analysis System Institute. SAS User's Guide version 9.4. Cary N. C. USA.
- Sawas, D. and Gruda, N. 2018. Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry - Areview. European Journal of Horticultural Science. 83(5):280-293.

- Sawas, D.; Giotis, D.; Chatzieustratiou, E.; Bakea, M. and Patakioutas, G. 2009. Silicon supply in soilless cultivations of zucchini alleviates stress induced by salinity and powdery mildew infections. *Environmental and Experimental Botany*. 65:11-17. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.07.004>.
- Sayed, G. M.; Mahmoud, M. A. W.; El-Mogy, M. M.; Ali, A. A. M.; Fahmy, A. M. M. and Tawfic, A. G. 2022. The Effective role of nano-silicon application in improving the productivity and quality of grafted tomato grown under salinity stress. *Horticulturae*. 8(4):293. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040293>.
- Schafer, G. and Luíza, L. B. 2022. Physical and chemical characteristics and analysis of plant substrate. *Ornamental Horticulture*. 28(2):181-192.
- Schaller, J.; Puppe, D.; Kaczorek, D.; Ellerbrock, R. and Sommer, M. 2021. Silicon cycling in soils revisited. *Plants*. 10(2):1-23. <https://doi.org/10.3390/plants10020295>.
- Senthikumar, M.; Amaresan, N. and Sankaranarayanan, A. 2021. Determination of chlorophyll. In: *Plant-Microbe Interactions*. (pp.145-146). M. Senthikumar., N. Amaresan. and A. Sankaranarayanan. (eds). Humana Press.
- Sequestration. *Journal of Advanced Research*. 30:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2024.05.027>.
- Sharma, V.; Sharma, L. and Sandhu, K. S. 2020. Cucumber (*Cucumis sativus* L.). 333-340 pp. In: *Antioxidants in Vegetables and Nuts-Properties and Health Benefits*. 1st ed. Nayik, G. A. and Gull, A. (Eds). Springer, Singapore.
- Shehata, S. A.; Saad, M. E. M.; Saleh, M. A. and Atala, S. A. 2018. Effect of foliar spray with potassium silicate on growth, yield, quality and storability of cucumber fruits. *Annals of Agricultural Science, Moshtohor*. 5(2):385-396.
- Shilpha, J.; Manivannan, A.; Soundararajan, P. and Ryong, J. B. 2023. Heat stress mitigation by silicon nutrition in plants: a comprehensive overview. In: *Benefits of silicon in the nutrition of plants*. (pp.328-346). R. P. De Mello (Ed.). Springer Cham.

- Shuangsheng S.; Zhengkun, Y.; Zhiyu, S.; Nannan, W.; Ning, G.; Jinghan, N.; Airong, L.; Bing, B.; Golam, J. A. and Shuangchen, C. 2022. Silicon enhances plant resistance to Fusarium wilt by promoting antioxidant potential and photosynthetic capacity in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Frontiers in Plant Science*. 13:1-16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1011859>.
- SIAP. 2023. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario estadístico de la producción agrícola. En: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de consulta (25/07/2024).
- Singh, P.; Kumar, V. and Sharma, A. 2023. Interaction of silicon with cell wall components in plants: a review. *Journal of Applied and Natural Science*. 15(2):480-497. <https://doi.org/10.31018/jans.v15i2.4352>.
- Soto-Bravo, F.; Araya-Cubero, E. A. y Echandi-Gurdian, C. 2020. Efecto de la densidad de siembra y volumen de sustrato sobre parámetros de riego y rendimiento de chile dulce ‘dulcítico’, en hidroponía bajo invernadero. *Agronomía Costarricense*. 44(1):43-64.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. In: *Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture* (pp.633-649). International Society for Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands.
- Tian, Z.; Jahn, M.; Qin, X.; Ochieng, O. H.; Yang, F.; Li, J. and Chen, J. 2021. Genetic and transcriptomic analysis reveal the molecular basis of photoperiod-regulated flowering in xishuangbanna Cucumber (*Cucumis sativus* L. var. *xishuangbannensis* Qi et Yuan). *Genes*.12(7):1-18. <https://doi.org/10.3390/genes12071064>.
- Trejo-Téllez, L. I. and Gómez-Merino, F. C. 2012. Nutrient solutions for hydroponic systems. In: *Hydroponics: A Standard Methodology for Plant Biological Researches*. A. Toshiki. (Ed.), pp 1-23. InTech.
- Trejo-Téllez, L. I.; Gómez-Merino, F. C. y Alcántar-Gozález, G. 2016. Elementos benéficos: potencialidades y limitantes. En: *Nutrición de los cultivos*. 2^{da} edición (pp.59-101). G. Alcántar-Gozález., L. I. Trejo-Téllez. y F. C. Gómez-Merino. (Eds.). Biblioteca Básica de Agricultura (BBA).

- Trejo-Téllez, L. I.; Ramírez-Martínez, M.; Gómez, Merino, F. C.; García-Alvarado, J. C.; Vaca-Castillo, G. A. y Tejeda-Sartorius, O. 2013. Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Pub. Esp.* (5):863-876.
- Trejo-Téllez, L. I.; Rodríguez-Mendoza, M. N.; Gómez-Merino, F. C. y Alcántar-González, G. 2016. Fertilización foliar. En: *Nutrición de cultivos*, 2^{da} ed. (pp. 281-318). G. Alcántar-González, L. I. Trejo-Téllez. y F. C. Gómez-Merino. (Eds.). Biblioteca Básica de Agricultura (BBA).
- Tripathi, P.; Subedi, S.; Latif, K. A.; Chung, Y. S. and Kim, Y. 2021. Silicon effects on the root system of diverse crop species using root phenotyping technology. *Plants*. 10(5):885. <https://doi.org/10.3390/plants10050885>.
- Tsukagoshi, S. and Shinohara, Y. 2020. Nutrition and nutrient uptake in soilless culture systems. In: *Plant Factory*. T. Kozai., G. Niu and M. Takagaki. (Eds.), pp 221-229. 2rd ed. Elsevier.
- Tubana, S. B.; Babú, T. and Lawrence, E. D. 2016. A Review of silicon in soils and plants and its role in US agricultura: history and future perspectives. *Soil Science*. 181(10):393-411.
- Varun, K. T. and Verma, R. 2024. A comprehensive review on soilless cultivation for sustainable agricultura. *Journal of Experimental Agriculture International*. 46(6):193-207.
- Velazquez-Gonzalez, R. S.; Garcia-Garcia, A. L.; Ventura-Zapata, E., Barceinas-Sanchez, J. D. O. and Sosa-Savedra, J. C. 2022. A Review on hydroponics and the technologies associated for medium-and small-scale operations. *Agriculture*. 12(5):1-21.
- Vercelli, M.; Minuto, A.; Minuto, G.; Contartese, V.; Devecchi, M. and Larcher, F. 2017. The effects of innovative silicon applications on growth and powdery mildew control in soilless grown cucumber (*Cucumis sativus* L.) and zucchini (*Cucurbita pepo* L.). *Acta Physiol Plant*. 39:129.

- Villa, V. V.; Alves, M. P. A.; Gomes, T. M.; Ferreira, N. A.; Goulart, M. V.; Soares, W. G. and Barreto, F. L. 2024. Deficit irrigation with silicon application as strategy to increase yield, photosynthesis and water productivity in lettuce crops. *Plants*. 13(7):1029. <https://doi.org/10.3390/plants13071029>.
- Wang, Y.; Zhang, B.; Jiang, D. and Chen, G. 2019. Silicon improves photosynthetic performance by optimizing thylakoid membrane protein components in rice under drought stress. *Environmental and Experimental Botany*. 158:117-124. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.11.022>.
- Weng, Y. 2020. *Cucumis sativus* Chromosome Evolution, Domestication, and Genetic Diversity: Implications for Cucumber Breeding. *Plant Breeding Reviews*. 44:79-111.
- Weraduwege, M. S.; Chen, J.; Anozie, C. F.; Morales, A.; Weise, E. S. and Sharkey, D. T. 2015. The relationship between leaf area growth and biomass accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Frontiers in Plant Science*. 6:167. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00167>.
- Yuvaraj, M.; Sathya, P. R.; Jagathjothi, N.; Saranya, M.; Suganthi, N.; Sharmila, R.; Cyriac, J.; Anitha, R. and Subramanian, K. S. 2023. Silicon nanoparticles (SiNPs): Challenges and perspectives for sustainable agricultura. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 128(1):1-11.
- Zavala-Borrego, F.; Reyes-González, A.; Álvarez-Reyna, V. P.; García-Carrillo, M.; Rodríguez-Moreno, V. M. y Preciado-Rangel, P. 2021. Efecto de diferentes niveles de evapotranspiración sobre área foliar, temperatura superficial, potencial hídrico y rendimiento en sorgo forrajero. *Terra Latinoamericana*. 39:1-14. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.954>.
- Zhang, Y.; Yu, S.; Hai-Jun, G.; Hai-Liang, Z.; Huan-Li, L.; Yan-Hong, H. and Yi-Chao, W. 2018. Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. *Journal of Integrative Agriculture*. 17(10):2151-2159.

ANEXOS

Anexo 1. Elementos del clima

Los valores máximos y mínimos de la temperatura y humedad relativa diarios y su respectivo promedio semanal reportados por el Dataloguer Elitech® durante el desarrollo del cultivo se muestran en el Cuadro 7.1.

Cuadro 7.1. Valores máximos y mínimos de temperatura y humedad relativa reportados durante el desarrollo del cultivo de pepino.

Mes	Semana	DDS	Fecha	T Máxima	T Mínima	HR Máxima	HR Mínima
Febrero	1	0	06/02/2024	36.7	20.2	78.3	28.6
		0	07/02/2024	36.5	21.3	76.2	27.4
		Promedio		36.6	20.8	77.3	28.0
	2	1	08/02/2024	36.0	16.2	74.6	24.6
		2	09/02/2024	36.7	17.2	87.0	20.1
		3	10/02/2024	37.2	15.6	86.2	23.4
		4	11/02/2024	37.6	18.1	81.1	32.1
		5	12/02/2024	38.2	16.3	84.3	29.1
		6	13/02/2024	36.1	21.1	76.2	30.4
		7	14/02/2024	37.5	20.2	72.5	31.2
	3	Promedio		37.0	17.8	80.3	27.3
		8	15/02/2024	36.3	20.0	76.2	28.1
		9	16/02/2024	37.8	19.7	65.2	19.2
		10	17/02/2024	38.0	17.6	74.3	20.0
		11	18/02/2024	37.5	21.2	69.4	16.2
		12	19/02/2024	38.6	20.4	66.4	17.6
		13	20/02/2024	38.2	21.2	64.1	18.2
	4	14	21/02/2024	38.1	20.8	61.6	19.4
		Promedio		37.8	20.1	68.2	19.8
		15	22/02/2024	38.9	22.4	57.0	20.5
		16	23/02/2024	38.8	17.5	76.8	20.7
		17	24/02/2024	38.1	19.2	72.1	28.5
		18	25/02/2024	37.6	20.1	87.6	31.1
		19	26/02/2024	38.3	18.3	66.7	25.3
		20	27/02/2024	37.6	18.9	75.7	26.6
		21	28/02/2024	38.4	19.1	74.0	24.0

		22	29/02/2024	37.3	19.2	53.5	23.8
			Promedio	38.1	19.3	70.4	25.1
		23	01/03/2024	37.5	19.0	70.8	22.6
		24	02/03/2024	37.9	18.0	61.8	19.1
		25	03/03/2024	38.0	17.9	64.9	17.4
1		26	04/03/2024	37.9	17.5	66.7	18.7
		27	05/03/2024	39.1	16.4	64.3	16.7
		28	06/03/2024	37.6	16.6	61.1	16.4
		29	07/03/2024	38.6	17.1	66.3	17.3
			Promedio	38.1	17.5	65.1	18.3
		30	08/03/2024	38.4	17.3	73.2	17.4
		31	09/03/2024	39.4	18.5	75.6	20.1
		32	10/03/2024	37.6	20.4	73.6	26.7
2		33	11/03/2024	39.8	18.8	64.7	15.1
		34	12/03/2024	40.4	18.3	62.9	16.3
		35	13/03/2024	39.4	18.8	64.2	18.0
		36	14/03/2024	39.5	18.9	63.5	17.7
			Promedio	39.2	18.7	68.2	18.8
Marzo		37	15/03/2024	39.2	17.9	60.7	16.3
		38	16/03/2024	39.9	17.9	62.6	20.8
		39	17/03/2024	37.8	18.3	62.0	21.3
3		40	18/03/2024	39.8	17.7	60.4	14.5
		41	19/03/2024	41.1	21.0	55.9	18.0
		42	20/03/2024	39.9	19.7	61.7	17.5
		43	21/03/2024	41.7	21.5	67.4	18.4
			Promedio	39.9	19.1	61.5	18.1
		44	22/03/2024	41.0	19.6	69.8	15.8
		45	23/03/2024	41.2	17.4	59.6	13.0
		46	24/03/2024	40.2	16.6	81.4	13.5
		47	25/03/2024	36.3	14.3	53.3	12.5
4		48	26/03/2024	39.0	13.2	51.4	10.8
		49	27/03/2024	40.3	13.9	47.1	9.9
		50	28/03/2024	40.1	15.6	45.0	11.4
		51	29/03/2024	40.3	16.0	55.3	14.7
		52	30/03/2024	39.4	16.2	50.4	18.1

		53	31/03/2024	40.9	19.2	57.3	22.1
			Promedio	39.9	16.2	57.1	14.2
		54	01/04/2024	40.2	20.3	64.3	22.7
		55	02/04/2024	40.3	20.8	68.2	25.6
		56	03/04/2024	41.0	21.7	70.3	23.7
	1	57	04/04/2024	39.3	16.0	45.1	13.5
		58	05/04/2024	39.8	16.2	55.4	16.2
		59	06/04/2024	41.5	18.5	53.5	15.5
		60	07/04/2024	41.4	19.7	55.6	13.5
			Promedio	40.5	19.0	58.9	18.7
		61	08/04/2024	40.2	19.4	57.0	21.1
		62	09/04/2024	41.1	18.2	55.7	18.6
		63	10/04/2024	40.1	20.5	60.5	22.3
	2	64	11/04/2024	41.9	20.5	62.3	16.5
		65	12/04/2024	41.0	22.2	66.8	21.8
		66	13/04/2024	42.4	23.8	54.9	21.5
Abril		67	14/04/2024	41.0	24.7	49.2	23.2
			Promedio	41.1	21.3	58.1	20.7
		68	15/04/2024	41.4	22.4	55.8	22.9
		69	16/04/2024	41.9	23.5	53.8	20.7
		70	17/04/2024	42.3	21.3	56.4	18.7
	3	71	18/04/2024	42.1	20.5	54.2	18.2
		72	19/04/2024	41.6	20.3	52.9	17.4
		73	20/04/2024	41.3	19.0	39.4	14.5
			Promedio	41.8	21.2	52.1	18.7
		74	21/04/2024	41.8	18.8	43.1	15.5
		75	22/04/2024	40.9	22.7	41.1	17.4
	4	76	23/04/2024	42.2	19.6	49.6	14.3
		77	24/04/2024	40.8	20.1	46.7	15.7
			Promedio	41.4	20.3	45.1	15.7

DDS= días después de la siembra. T= temperatura. HR= humedad relativa

Anexo 2. Análisis de agua

Se usó agua de pozo profundo para el riego del cultivo, de la cual se tomó una muestra de 1 L y se mandó a analizar al conjunto de laboratorios del Centro de Innovación y Desarrollo Agroalimentario de Michoacán (CIDAM). Los resultados obtenidos muestran que es un agua de buena calidad, ideal para el riego de cualquier hortaliza. Presenta un pH de 7.17 (neutro); una conductividad eléctrica de 0.31 dS m⁻¹ (baja); sin presencia de carbonatos y niveles de bicarbonatos moderadamente bajos (2.63 meq L⁻¹); un contenido de cloruros de 2.63 meq L⁻¹ (bajo) y una relación de absorción de sodio (RAS) de 0.27 (baja). El agua presentó niveles bajos de todos los iones, a excepción del magnesio que estaba en nivel medio (Cuadro 7.2).

Cuadro 7.2. Resultado de las características químicas del agua de pozo profundo.

Macronutrientes	NO ₃ ⁻	HPO ₄ ⁼	SO ₄ ⁼	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
(meq L ⁻¹)	0.21	0.01	0.24	0.72	2.43	0.03	0.34
Micronutrientes	B	Fe	Mn	Cu	Zn	Ar	
(mg L ⁻¹)	0.01	0.03	0.001	0.01	0.01	0.001	

Anexo 3. Formulación de la solución nutritiva

Considerando el análisis de agua se formuló la solución nutritiva por etapa fenológica, con una conductividad eléctrica de 1.0 dS m⁻¹ en la primera semana de establecimiento (Cuadro 7.3 y 7.4); 1.5 dS m⁻¹ en la fase vegetativa (Cuadro 7.5 y 7.6); 1.8 dS m⁻¹ en la fase de floración y amarre (Cuadro 7.7 y 7.8) y una CE de 2.0 en la fase de desarrollo de frutos (Cuadro 7.9 y 7.10).

Para determinar la cantidad de ácidos necesaria en mL (corrección por pureza) se usó la siguiente fórmula: mL = ((100 / % PA) × gA) / ρ. Donde: mL = mililitros de ácido que deben ser aplicados al rotoplas de 2 500 L. PA = pureza del ácido. gA = gramos requeridos de ácido. ρ = densidad del ácido. La pureza y densidad del ácido fosfórico fue de 85 % y 1.7 g mL⁻¹, respectivamente y del ácido sulfúrico de 98 % y 1.83 g mL⁻¹.

Cuadro 7.3. Balance de la solución nutritiva aplicada en el establecimiento del cultivo.

iones	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CE (dS m ⁻¹)
meq L ⁻¹	6	0.5	3.5	4.5	2	3.5	1
Aporte del agua	0.21	0.01	0.24	0.72	2.40	0.03	
SN Ajustada	5.79	0.49	3.26	3.78	-0.4	3.47	
Nitrato de Calcio	3.78			3.78			
Nitrato de potasio	2.01					2.01	
Sulfato de potasio			1.46			1.46	
Ácido fosfórico		0.49					
Ácido sulfúrico			1.8				

Cuadro 7.4. Cantidad de fertilizantes (g) y ácidos (mL) requeridos para preparar 2 500 L de solución nutritiva aplicada en el establecimiento del cultivo.

Fertilizantes	meq L ⁻¹	Peso equivalente	g 1000 L ⁻¹	Corrección por pureza	g L ⁻¹	g 2500 L ⁻¹
Nitrato de Calcio	3.78	118	446.04	446.04	0.45	1115.1
Nitrato de potasio	2.01	101	203.01	203.01	0.20	507.5
Sulfato de potasio	1.46	87.2	127.312	127.312	0.13	318.3
Ácido fosfórico	0.49	32.6	15.974	11.055	0.011	27.64
Ácido sulfúrico	1.8	49	88.2	49.180	0.049	122.95

Cuadro 7.5. Balance de la solución nutritiva aplicada en la fase vegetativa del cultivo.

iones	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CE (dS m ⁻¹)
meq L ⁻¹	9	0.75	5.25	6.75	3	5.25	1.5
Aporte del agua	0.21	0.01	0.24	0.72	2.4	0.03	
SN Ajustada	8.79	0.74	5.01	6.03	0.6	5.22	
Nitrato de Calcio	6.03			6.03			
Nitrato de potasio	2.76					2.76	
Sulfato de magnesio			0.6		0.6		
Sulfato de potasio			2.46			2.46	
Ácido fosfórico		0.74					
Ácido sulfúrico			1.95				

Cuadro 7.6. Cantidad de fertilizantes (g) y ácidos (mL) requeridos para preparar 2 500 L de solución nutritiva aplicada en la fase vegetativa del cultivo.

Fertilizantes	meq L ⁻¹	Peso equivalente	g 1000 L ⁻¹	Corrección por pureza	g L ⁻¹	g 2500 L ⁻¹
Nitrato de Calcio	6.03	118	711.54	711.54	0.71	1778.9
Nitrato de potasio	2.76	101	278.76	278.76	0.28	696.9
Sulfato de magnesio	0.6	123.2	73.92	73.92	0.07	184.8
Sulfato de potasio	2.46	87.2	214.512	214.512	0.21	536.3
Ácido fosfórico	0.74	32.6	24.124	16.695	0.017	41.74
Ácido sulfúrico	1.95	49	95.55	53.279	0.053	133.20

Cuadro 7.7. Balance de la solución nutritiva aplicada en la fase de floración y marre de frutos.

iones	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CE (dS m ⁻¹)
meq L ⁻¹	10.8	0.9	6.3	8.1	3.6	6.3	1.8
Aporte del agua	0.21	0.01	0.24	0.72	2.4	0.03	
SN Ajustada	10.59	0.89	6.06	7.38	1.2	6.27	
Nitrato de Calcio	7.38			7.38			
Nitrato de potasio	3.21					3.21	
Sulfato de magnesio			1.2		1.2		
Sulfato de potasio			3.06			3.06	
Ácido fosfórico		0.89					
Ácido sulfúrico			1.8				

Cuadro 7.8. Cantidad de fertilizantes (g) y ácidos (mL) requeridos para preparar 2 500 L de solución nutritiva aplicada en la fase de floración y marre de frutos.

Fertilizantes	meq L ⁻¹	Peso equivalent e	g 1000 L ⁻¹	Corrección por pureza	g L ⁻¹	g 2500 L ⁻¹
Nitrato de Calcio	7.38	118	870.84	870.84	0.87	2177.1
Nitrato de potasio	3.21	101	324.21	324.21	0.32	810.5
Sulfato de magnesio	1.2	123.2	147.84	147.84	0.15	369.6
Sulfato de potasio	3.06	87.2	266.832	266.832	0.27	667.1
Ácido fosfórico	0.89	32.6	29.014	20.079	0.020	50.20
Ácido sulfúrico	1.8	49	88.2	49.180	0.049	122.95

Cuadro 7.9. Balance de la solución nutritiva aplicada en la fase de desarrollo de frutos.

iones	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CE (ds m ⁻¹)
meq L ⁻¹	12	1	7	9	4	7	2.0
Aporte del agua	0.21	0.01	0.24	0.72	2.40	0.03	
SN Ajustada	11.79	0.99	6.76	8.28	1.6	6.97	
Nitrato de Calcio	8.28			8.28			
Nitrato de potasio	3.51					3.51	
Sulfato de magnesio			1.6		1.6		
Sulfato de potasio			3.46			3.46	
Ácido fosfórico		0.99					
Ácido sulfúrico			1.7				

Cuadro 7.10. Cantidad de fertilizantes (g) y ácidos (mL) requeridos para preparar 2 500 L de solución nutritiva aplicada en la fase de desarrollo de frutos.

Fertilizantes	meq L ⁻¹	Peso equivalente	g 1000 L ⁻¹	Corrección por pureza	g L ⁻¹	g 2500 L ⁻¹
Nitrato de Calcio	8.28	118	977.04	977.04	0.98	2442.6
Nitrato de potasio	3.51	101	354.51	354.51	0.35	886.3
Sulfato de magnesio	1.6	123.2	197.12	197.12	0.20	492.8
Sulfato de potasio	3.46	87.2	301.712	301.712	0.30	754.3
Ácido fosfórico	0.99	32.6	32.274	22.335	0.022	55.84
Ácido sulfúrico	1.7	49	83.3	46.448	0.046	116.12

Cuadro 7.11. Correlación entre las variables de crecimiento, rendimiento y calidad de frutos de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y la dosis de silicio.

	LT	DT	NH	AF	CH	MSH	MST	MSR	MSTL	PFP	NFP	PM	LF	DF	FR
LT	1.00	0.51**	0.46**	0.59**	0.26	0.27	0.99**	0.14	0.26	0.47**	0.56**	0.32	0.38*	0.36*	0.36*
DT		1.00	0.55**	0.50**	0.49**	0.43*	0.10	0.13	0.43*	0.56**	0.39*	0.55**	0.46**	0.43**	0.47**
NH			1.00	0.34*	0.30	0.37*	0.25	0.21	0.40*	0.19	0.21	0.13	0.35*	0.57**	0.32
AF				1.00	0.28	0.52**	-0.01	0.07	0.48**	0.55**	0.54**	0.46**	0.32	0.42*	0.62**
CH					1.00	-0.03	0.12	0.16	0.01	0.30	0.35*	0.21	0.25	0.16	0.45**
MSH						1.00	0.28	-0.04	0.97**	0.27	0.38*	0.13	0.15	0.34*	0.49**
MST							1.00	0.07	0.48**	-0.06	0.04	-0.14	-0.5	0.08	-0.01
MSR								1.00	0.07	0.91**	0.43**	0.06	-0.15	0.01	0.34*
MSTL									1.00	0.23	0.35*	0.09	0.11	0.33*	0.48**
PFP										1.00	0.81**	0.92**	0.46**	0.36*	0.50**
NFP											1.00	0.51**	0.28	0.18	0.58**
PMF												1.00	0.46**	0.44**	0.34*
LF													1.00	0.61**	-0.1
DF														1.00	0.14
FR															1.00

LT= longitud del tallo, DT= diámetro del tallo, NH= número de hojas, AF= área foliar, CH= clorofila de las hojas, MSH= materia seca de las hojas, MST= materia seca del tallo, MSR= materia seca de la raíz, MSTL= materia seca total, PF= peso de frutos por planta, NF= número de frutos por planta, PMF= peso medio de los frutos, LF= longitud del fruto, DF= diámetro del fruto, FR= firmeza. *= significativo ($p \leq 0.05$), **= altamente significativo ($p \leq 0.01$).

Cuadro 7.12. Correlación entre las variables de crecimiento, rendimiento, calidad de frutos y concentración nutrimental en hojas de plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y la dosis de silicio.

	SST	pH	AT	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Zn	Mn	Cu	B	Mo
LT	-0.17	0.27	-0.22	0.43**	0.06	0.38*	0.24	0.25	0.31	-0.11	-0.11	-0.09	-0.20	0.14	0.33*
DT	0.09	0.18	-0.23	0.15	0.44**	0.52**	0.17	0.26	0.30	-0.14	0.01	-0.09	-0.10	-0.17	0.11
NH	0.21	0.15	-0.13	0.44**	-0.08	0.44**	0.13	0.27	0.39*	-0.28	-0.26	-0.25	-0.39*	0.26	0.41**
AF	-0.14	0.24	-0.17	0.82**	0.12	0.28	0.12	0.17	0.21	-0.22	-0.17	-0.22	-0.19	0.01	0.29
CH	-0.20	0.02	-0.20	-0.07	-0.03	-0.10	-0.14	0.42**	-0.12	0.08	-0.15	0.06	-0.08	0.24	0.22
MSH	0.27	0.28	-0.14	0.02	0.14	0.51**	0.00	0.08	0.36*	-0.39	-0.29	-0.38*	-0.35*	-0.03	0.21
MST	0.09	-0.04	-0.12	-0.09	-0.09	0.25	-0.16	-0.12	0.12	-0.33	-0.42*	-0.35*	-0.33	0.03	0.14
MSR	-0.04	0.20	-0.05	0.21	0.70**	-0.11	0.06	-0.02	-0.19	0.35*	0.17	0.36**	0.30	-0.14	-0.03
MSTL	0.27	0.26	-0.15	0.01	0.10	0.51**	-0.02	0.48**	0.34*	-0.40**	-0.34*	-0.39*	-0.36	-0.02	0.22
PFP	-0.23	0.27	-0.36**	0.14	0.13	0.49**	0.18	0.24	0.01	-0.05	-0.02	-0.02	0.03	-0.16	0.05
NFP	-0.28	0.03	-0.30	0.14	0.01	0.22	0.08	0.19	0.01	-0.10	-0.19	-0.09	-0.08	-0.03	0.26
PMF	-0.15	0.17	-0.32	0.12	0.19	0.31*	0.23	0.24	0.02	0.01	0.11	0.05	0.11	-0.21	-0.10
LF	0.05	-0.19	-0.20	-0.02	-0.01	0.27	0.07	0.15	0.17	-0.18	-0.13	-0.16	-0.21	0.07	0.20
DF	0.16	0.16	-0.03	0.24	-0.04	0.34*	0.28	0.24	0.34*	-0.22	-0.20	-0.19	-0.33	0.27	0.12
FR	-0.06	0.63**	-0.18	0.12	0.15	0.22	0.72**	0.12	0.02	0.01	0.03	0.01	0.10	-0.20	0.22

LT= longitud del tallo, DT= diámetro del tallo, NH= número de hojas, AF= área foliar, CH= clorofila de las hojas, MSH= materia seca de las hojas, MST= materia seca del tallo, MSR= materia seca de la raíz, MSTL= materia seca total, PF= peso de frutos por planta, NF= número de frutos por planta, PMF= peso medio de los frutos, LF= longitud del fruto, DF= diámetro del fruto, FR= firmeza, SST= sólidos solubles totales (°Brix), AT= acidez titulable. * = significativo ($p \leq 0.05$), ** = altamente significativo ($p \leq 0.01$).

Cuadro 7.13. Correlación entre las variables de calidad de frutos y concentración nutrimental en hojas de plantas de pepino cultivadas en tezontle en función de la vía de aplicación y la dosis de silicio.

	SST	pH	AT	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Zn	Mn	Cu	B	Mo
SST	1.00	0.13	0.46**	-0.24	-0.03	0.43**	-0.07	0.05	0.22	-0.10	0.04	-0.10	-0.13	0.02	0.68**
pH		1.00	0.00	0.22	0.14	-0.12	0.14	0.03	-0.17	0.07	-0.02	0.06	0.13	-0.07	0.48**
AT			1.00	0.05	-0.12	-0.20	0.23	0.11	0.28	0.34*	0.26	0.27	0.14	0.22	0.10
N				1.00	0.12	0.05	0.73**	0.60**	-0.13	0.25	-0.03	0.28	0.15	0.16	-0.03
P					1.00	0.23	0.13	0.14	-0.00	-0.22	0.21	-0.19	0.28	-0.79**	-0.36*
K						1.00	0.06	0.30	0.77**	-0.55**	-0.20	-0.48**	-0.49**	-0.09	0.53**
Ca							1.00	0.91**	0.09	0.13	0.00	0.14	0.05	0.24	0.13
Mg								1.00	0.27	-0.07	-0.11	-0.05	-0.13	0.23	0.40**
S									1.00	-0.48*	-0.03	-0.43**	-0.56**	0.22	0.58**
Fe										1.00	0.73**	0.99**	0.84**	-0.07	-0.24
Zn											1.00	0.76**	0.80**	-0.43**	-0.25
Mn												1.00	0.84**	-0.09	-0.25
Cu													1.00	-0.56**	-0.47**
B														1.00	0.43**
Mo															1.00

SST= sólidos solubles totales (^oBrix), **AT**= acidez titulable. *= significativo ($p \leq 0.05$), **= altamente significativo ($p \leq 0.01$).

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría Interinstitucional en Agricultura Protegida.	
Título del trabajo	Vía de aplicación y dosis de silicio en la producción de pepino cultivado en tezontle.	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Rogelio Nuñez Ambriz	2354548x@umich.mx
Director	Patricio Apáez Barrios	patricio.apaez@umich.mx
Codirector	-----	-----
Coordinador del programa	Patricio Apáez Barrios	mae.agricultura.protegida@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

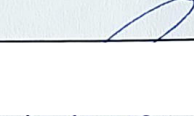
Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	Sí	Los documentos en inglés usados para consultar información necesaria para la investigación, se tradujeron mediante IA (Traductor de Google).
Traducción a otra lengua	Sí	El apartado de Summary en la tesis se tradujo del español al inglés con el traductor de Microsoft Word versión 2021.
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	

Otro	No	
------	----	--

Datos del solicitante	
Nombre y firma	 Rogelio Nuñez Ambriz
Lugar y fecha	Apatzingán, Michoacán a 13 de septiembre de 2025.

Rogelio Nuñez Ambriz

VÍA DE APLICACIÓN Y DOSIS DE SILICIO EN LA PRODUCCIÓN DE PEPINO CULTIVADO EN TEZONTLE.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:499976973

Fecha de entrega

17 sep 2025, 10:41 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

17 sep 2025, 10:52 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

VÍA DE APLICACIÓN Y DOSIS DE SILICIO EN LA PRODUCCIÓN DE PEPINO CULTIVADO EN TEZONTLE.pdf

Tamaño del archivo

2.6 MB

100 páginas

30.194 palabras

145.782 caracteres

16% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 15%  Fuentes de Internet
- 11%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
37 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
21 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.