

**Universidad Autónoma De Sinaloa  
Colegio de Ciencias Agropecuarias  
Facultad de Agronomía  
Maestría en Ciencias Agropecuarias**



**TESIS**

**“SILICIO Y CLORO EN EL CRECIMIENTO DE  
PLÁNTULAS, RENDIMIENTO Y CALIDAD  
POSTCOSECHA DE TOMATE F<sub>3</sub>”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**PRESENTA:  
GILBERTO QUEVEDO SOTO**

**DIRECTORA DE TESIS:  
DRA. TERESA DE JESÚS VELÁZQUEZ ALCARAZ**

**CO-DIRECTOR:  
DR. FELIPE AYALA TAFOYA**

**CULIACÁN, SINALOA, JUNIO DE 2019**

ESTA TESIS FUE REALIZADA POR **GILBERTO QUEVEDO SOTO** BAJO LA DIRECCIÓN DEL CONSEJO PARTICULAR QUE SE INDICA, HA SIDO APROBADA POR EL MISMO Y ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**COMITÉ PARTICULAR**

DIRECTORA

  
DRA. TERESA DE JESÚS VELÁZQUEZ ALCARAZ

CO-DIRECTOR

  
DR. FELIPE AYALA TAFOYA

ASESORA

  
M. C. LUZ LLARELY CÁZAREZ FLORES

ASESOR

  
DR. CARLOS ALFONSO LÓPEZ ORONA

ASESOR

  
DR. MOISÉS GILBERTO YÁÑEZ JUÁREZ



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA**  
**COLEGIO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA CULIACÁN  
FACULTAD DE AGRONOMÍA VALLE DEL FUERTE  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR  
FACULTAD DE AGRONOMÍA VALLE DEL CARRIZO

En la Ciudad de Culiacán Rosales, Sinaloa, el día 20 de enero del año 2020, el que suscribe

Gilberto Quevedo Soto, alumno del Programa de Maestría en Ciencias Agropecuarias, con número de cuenta 283596, de la Unidad Académica Facultad de Agronomía, del Colegio de Ciencias Agropecuarias de la UAS, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la Dra. Teresa de Jesús Velázquez Alcaraz y del Dr. Felipe Ayala Tafoya y cede los derechos del trabajo titulado "Silicio y Cloro en el crecimiento de plántulas, rendimiento y calidad postcosecha de tomate F<sub>3</sub>", a la Facultad de Agronomía, del Colegio de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Sinaloa, para su difusión, con fines académicos y de investigación por medios impresos y digitales, todo esto en apego al artículo 27 de la Ley Federal de Derechos de Autor.

La Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México) protege el contenido de la presente tesis. Los usuarios de la información contenida en ella deberán citar obligatoriamente la tesis como fuente, dónde la obtuvo y mencionar al autor intelectual. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ATENTAMENTE

Gilberto Quevedo Soto

CORREO ELECTRÓNICO: tec.quevedo91@gmail.com  
CURP: QUSG911214HSLVTL06

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi agradecimiento total a la **Universidad Autónoma de Sinaloa** y al **Colegio de Ciencias Agropecuarias**, por darme la oportunidad de haber estudiado la maestría en ciencias agropecuarias incluida en el programa nacional del posgrado de calidad del CONACYT.

A la **Facultad de Agronomía** y a la **Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia** por asignarme maestros en ambas instituciones y facilitarme los medios suficientes para llevar esto acabo.

## DEDICATORIA

Los resultados de esta tesis, están dedicados a todas aquellas personas que, de alguna forma, son parte de su culminación.

**A mis padres** por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Me formaron con reglas y algunas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos.

Gracias padre y madre.

**A mi comité particular;** mi directora de tesis **Dra. Teresa de Jesús Velázquez Alcaraz, Dr. Felipe Ayala Tafoya, M. C. Luz Llarely Cázarez Flores, Dr. Carlos Alfonso López Orona, Dr. Moisés Gilberto Yáñez Juárez**, quienes se han tomado la noble tarea de transmitirme sus diversos conocimientos, especialmente del campo y de los temas que corresponden a mi profesión. Pero además de eso, me han ofrecido sabios conocimientos para lograr mis metas y lo que me proponga.

Maestros, su labor muchas veces subestimada, se enfoca en cuidar los saberes del mundo, y permitirle a otros, expandir sus conocimientos. Nos ayudan a vivir el sueño de superarnos y cumplir nuestras expectativas, y de siempre ir por la constante mejora.

Esta ocasión no ha sido la excepción, y exalto su trabajo, y le agradezco con creces por ayudarme a lograr esta nueva meta, mi maestría.

# ÍNDICE

	Pág
AGRADECIMIENTOS	
DEDICATORIAS	
ÍNDICE	
ÍNDICE DE CUADROS.....	i
RESUMEN.....	ii
ABSTRACT.....	iii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, HIPÓTESIS Y OBJETIVO.....	3
2.1. Planteamiento del problema.....	3
2.2. Hipótesis.....	3
2.3. Objetivo general.....	3
III. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
3.1. Historia y origen del tomate.....	4
3.2. Importancia alimenticia del tomate.....	5
3.3. Producción de tomate.....	5
3.4. Producción de tomate bajo agricultura protegida.....	5
3.5. Clasificación Taxonómica.....	7
3.6. Morfología.....	7
3.6.1. Sistema radicular.....	7
3.6.2. Tallos y hojas.....	7
3.6.3. Flores, frutos y semillas.....	8
3.7. Fenología y ciclo del cultivo.....	8
3.8. Temperatura en crecimiento y desarrollo de tomate.....	8
3.9. Fertilización.....	9

3.10. Silicio.....	10
3.10.1. El silicio en plantas.....	13
3.10.2. El silicio como elemento benéfico en la fisiología de la planta.....	14
3.10.3. Silicio como mecanismo de defensa.....	15
3.10.4. Implicaciones del silicio en la fisiología de las plantas.....	16
3.10.5. Silicio como fertilizante.....	17
3.10.6. Relación del fósforo con el silicio.....	19
3.10.7. El silicio en la prevención y control de plagas y enfermedades.....	20
3.10.8. Papel del silicio en la resistencia de las plagas agrícolas.....	21
3.11. Cloro en las plantas.....	22
3.11.1. Cloro como fertilizante.....	22
3.11.2. Funciones fisiológicas del cloro en las plantas.....	23
3.11.3. Efecto de cloro en la producción de las plantas.....	24
3.12. Antagonismo de elementos.....	24
IV. MATERIALES Y MÉTODOS .....	27
V. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	27
VI. CONCLUSIONES.....	32
VII. LITERATURA CITADA.....	33

## ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Efecto de la temperatura en el cultivo del tomate.....	10
Cuadro 2. Verdor, altura, área foliar, materia seca de raíz y parte aérea de plántulas de tomate.	30
Cuadro 3. Crecimiento de tomate F <sub>3</sub> bajo condiciones de casa sombra.....	32
Cuadro 4. ° Brix y pH de frutos de tomate cultivado bajo condiciones de casa sombra.....	33

## RESUMEN

Esta investigación se realizó para dilucidar el efecto que ocasiona el silicio, cloro o la combinación de ambos en crecimiento, rendimiento y calidad postcosecha de tomate F<sub>3</sub>. En un experimento se sembró tomate F<sub>3</sub>, en charolas de poliestireno rellenas con peat moss en casa sombra y se fertilizaron con 1.0 g de N L<sup>-1</sup> y fertilizante foliar (Micro min 20-30-10). En otro experimento con plantas de tomate sembradas en un suelo vertisol crómico bajo casa sombra, la separación entre plantas fue de 25 cm y camas con separación de 1.6 m entre sí, con sistema de riego por goteo. Para ambos experimentos se utilizó el diseño experimental de bloques completos al azar, donde los tratamientos fueron: 20, 30 y 50 mg de Si o Cl y las relaciones v/v de 20:20, 30:30 y 50:50 mg de Si:Cl L<sup>-1</sup>, más el testigo. Las variables de estudio fueron: verdor, altura, área foliar, peso seco de la parte aérea, peso seco de raíz en plántulas, así como verdor, altura, área foliar, rendimiento y calidad postcosecha en plantas de tomate. Silicio y Cloro en dosis de 20, 30 y 50 mg L<sup>-1</sup> fueron eficaces para incrementar el crecimiento de plántulas, pero cuando se aplicó a través del riego por goteo en plantas con cinco hojas verdaderas, los efectos fueron menores y contrarios a los que se observaron en las plantas testigos. En cambio las dosis más adecuadas para incrementar °Brix fueron Si y Cl en dosis de 20, 30 y 50 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, en relación al testigo.

**Palabras clave:** *Casa sombra, suelo vertisol, altura, área foliar, peso seco de hojas y raíces.*

## SUMMARY

This research was carried out to elucidate the effect caused by silicon, chlorine or the combination of both in growth, yield and post-harvest quality of tomato F<sup>3</sup>. In one experiment, F<sub>3</sub> tomato was planted in polystyrene trays filled with peat moss in the shade house and fertilized with 1.0 g of N L<sup>-1</sup> and foliar fertilizer (Micro min 20-30-10). In another experiment with tomato plants planted in a chromic vertisol soil under a shade house, the separation between plants was 25 cm and beds with a separation of 1.6 m from each other, with a drip irrigation system. For both experiments, the experimental design of randomized complete blocks was used, where the treatments were: 20, 30 and 50 mg of Si or Cl and the v / v ratios of 20:20, 30:30 and 50:50 mg of Si : Cl L<sup>-1</sup>, plus the witness. The study variables were: greenness, height, leaf area, dry weight of the aerial part, root dry weight in seedlings, as well as greenery, height, leaf area, yield and post-harvest quality in tomato plants. Silicon and chlorine in doses of 20, 30 and 50 mg L<sup>-1</sup> were effective to increase the growth of seedlings, but when applied through drip irrigation in plants with five true leaves, the effects were minor and contrary to those were observed in the control plants. On the other hand, the most adequate doses to increase ° Brix were Si and Cl in doses of 20, 30 and 50 mg L<sup>-1</sup>, respectively, in relation to the control.

**Index words:** *Shaded house, vertisol soil, height, foliar area, dry weight of leaves and roots.*

## I. INTRODUCCIÓN

El tomate es originario de Sudamérica pero su domesticación se llevó a cabo en México, se considera el segundo vegetal más importante en el mundo después de la papa, las principales variedades comerciales son: tomate bola, cherry, saladette, pera, beef, marmande, vemone, moneymaker, muchamiel, pometa tardío, san marzano, cocktail, ramillete y liso (SAGARPA, 2010).

Actualmente el tomate ocupa el primer lugar entre las hortalizas más importantes del mundo (FAO, 2013). Esto se debe a su alta demanda en la industria (Peralta y Spooner, 2007), por su amplia gama de usos para el consumo en fresco y por ser fuente de vitaminas y minerales (Bao *et al.*, 2007).

De acuerdo a FIRA (2016) la producción de jitomate en México creció a una tasa promedio anual de 3.3 por ciento entre 2005 y 2015, para ubicarse en 3.1 millones de t, durante ese período, la superficie total destinada a este cultivo disminuyó a una tasa promedio anual de 3.8%. Del total de la superficie sembrada de tomate a nivel nacional, el 25.6% se concentra en Sinaloa y en éste se obtiene un rendimiento de 66 t ha<sup>-1</sup>. El volumen de la producción nacional del 2006 al 2015, se obtuvo un promedio de 2,448 t, el consumo per cápita es de 13.8 kg (Atlas agroalimentario, 2016). En 1980 se sembraron 85,500 ha, en 2000 75,900 ha y en 2015 50,596 ha. La tendencia a la baja en la superficie sembrada se deriva del decremento en la superficie cultivada a cielo abierto, mientras que el cultivo en condiciones de agricultura protegida (malla sombra e invernaderos) continúa en expansión constante. Así, el volumen de tomate rojo obtenido con el uso de estas últimas tecnologías pasó del 2.9% en 2005 a 32.2% en 2010, y hasta 59.6% del volumen total en 2015 (FIRA, 2016).

En producción de jitomate a nivel mundial, México ocupa el décimo lugar y contribuye con el 2% de la oferta mundial con 2, 694,358 t y en comercio exterior en el 2015 tuvo un ascenso en exportación reflejándose un volumen 1.5 % mayor que el 2014. Esta hortaliza ocupa el 22% en la participación nacional y en producción de hortalizas con un rendimiento de 10.5 t ha<sup>-1</sup> (Atlas Agroalimentario, 2016).

De los 50.8 millones de mexicanos que trabajan, 5.3 millones lo hacen en actividades agrícolas, Los productos alimenticios se han convertido en interés relevante y preocupación a nivel internacional, por lo que México resalta entre las naciones que más productos del campo exporta, la variedad y calidad han contribuido en la consecución de un superávit comercial agroalimentario favorable por 960 millones de dólares en 2015 (Atlas Agroalimentario, 2016).

Para satisfacer dichas necesidades es necesario considerar que las plantas necesitan de nutrientes, existen 17 nutrientes que se consideran esenciales para la vida de las plantas. Cabe mencionar que el silicio no se encuentra dentro de estos, sin embargo el silicio, es un elemento que beneficia a ciertas plantas cuando están bajo estrés. Se ha comprobado que mejora la tolerancia a las sequías y retrasa la defoliación prematura de algunos cultivos que no se riegan y que puede mejorar la capacidad de resistencia de las plantas a las toxicidades de micronutrientes y de otros metales, como por ejemplo, aluminio, cobre, hierro, manganeso, zinc, entre otros (Halvin *et al.*, 2005).

## **II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, HIPÓTESIS Y OBJETIVO**

### **2.1 Planteamiento del problema**

En tomate no se conoce la respuesta del verdor, altura, área foliar, peso seco de raíces, peso seco de la parte aérea y de la calidad de plántulas después de haber aplicado 20, 30 ó 50 mg L<sup>-1</sup> de silicio y cloro, respectivamente, y una relación 1:1 de ambos elementos, más la fertilización con 1 g L<sup>-1</sup> de N, aplicados en el riego por decantación manual en charolas de poliestireno.

Asimismo, la respuesta del verdor, altura, área foliar, rendimiento y calidad postcosecha, después de aplicar dosis de silicio, cloro o la combinación de ambos a través del riego por goteo, en plantas con cinco hojas verdaderas.

### **2.2 Hipótesis**

Si, Cl o la combinación de ambos, pueden ser elementos benéficos, cuando se aplican por el método de riego por decantación manual en charolas de poliestireno, en plántulas de tomate con la primera hoja verdadera, inducen a que éstas incrementen el verdor, altura, área foliar, peso seco de raíces y peso seco de la parte aérea.

De igual manera, cuando a través del riego por goteo en plantas con cinco hojas verdaderas y ocasionan incrementos en verdor, altura, área foliar, rendimiento y calidad postcosecha.

### **2.3 Objetivo general**

Determinar el efecto que ocasiona el silicio, cloro o la combinación de ambos elementos en el verdor, altura, área foliar, peso seco de raíces y peso seco de la parte aérea de plántulas, cuando se aplica por el método de decantación manual en charolas de poliestireno, en plántulas de tomate con la primera hoja verdadera.

De la misma forma, cuando se aplica por medio del riego por goteo en plantas con cinco hojas verdaderas, para conocer la respuesta del verdor, altura, área foliar, rendimiento y calidad postcosecha.

### III. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1 Historia y origen del tomate

Según Tavares de Mello (SF), el tomate es una de las hortalizas más difundidas en el mundo y la de mayor valor económico. Existen diversas opiniones acerca del centro de origen de esta especie. Tiene su centro de origen en la zona oeste de América del Sur, entre el norte de Chile y sur de Colombia, donde crece en forma silvestre, al igual que todas las otras especies del reducido género *Solanum* (antes *Lycopersicon*). Fue llevada al viejo mundo por los conquistadores a través de España en el año 1500 y la ruta de migración en el viejo continente fue desde el Mediterráneo hacia el norte del continente. Las formas botánicas silvestres y más ancestrales de las cuales descienden los cultivares modernos, son nativas de la región andina, en una faja de 300 km de ancho, limita al Sur con Chile, por los 30° de latitud, al norte por el Ecuador, al este por la cordillera de los Andes y al oeste por el Océano Pacífico (hasta las islas Galápagos). La primera descripción del tomate, fue publicada por el italiano Pier Andea Mattioli, en la edición del herbario de 1554, lo denominó "pomi d'oro" (manzana dorada), origen del actual nombre italiano "pomodoro" (Warnock, 1988).

Los tomates fueron domesticados en América, sin embargo, el sitio original donde esto ocurrió se desconoce. Los primeros acontecimientos de domesticación han sido poco estudiados (Peralta *et al.*, 2006). Dos hipótesis se han propuesto para definir el sitio donde estos eventos ocurrieron: uno peruano y el mexicano. Aunque la prueba definitiva para el tiempo y lugar de la domesticación se desconoce, se presume que es México la región más probable de la domesticación, y Perú como centro de diversidad para los parientes silvestres (Larry y Joanne, 2007). *S. lycopersicum* variedad *Cerasiforme* se cree que es el ancestro del tomate cultivado, basada en su amplia presencia en América Central y la característica de poseer una flor con un estilo corto (Spooner *et al.*, 2003); sin embargo, recientes investigaciones genéticas han demostrado que las plantas de frutos *Cerasiformes* son una mezcla de tomates

silvestres y cultivadas en lugar de ser "ancestrales" de los tomates cultivados (Nesbitt y Tanksley, 2002).

### **3.2 Importancia alimenticia del tomate**

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es la hortaliza de mayor importancia en el mundo teniendo en cuenta su valor económico y nutricional. Posee un alto contenido de B-carotenos (licopeno), vitamina A, vitamina C (ácido ascórbico), minerales (calcio, hierro, fósforo y potasio) y aminoácidos (tiamina y niacina) (Gebhart y Matthews, 1981). El color rojo del tomate se determina por el color de la piel y de la pulpa. El color de la piel varía de amarillo a incoloro, mientras que el color de la pulpa oscila entre el verde y rojo. Durante la maduración, el nivel de licopeno es 500 veces más elevado. El licopeno es un potente antioxidante que se asocia con una baja incidencia de ciertas formas de cáncer humano. Recientemente, los tomates con alto contenido de licopeno se han incorporado al mercado en fresco (Miller *et al.*, 2002).

### **3.3 Producción de tomate**

La producción de tomates representa cerca del 33% de la producción hortícola mundial. En el año 2000, alcanzó un volumen total de 107, 316,000 t y en el año 2007 fue de 129, 942,416 t; el área de cultivo se ha incrementado en 18.8%, al pasar de 3, 892,820 ha a 4, 643,957 ha en el periodo anteriormente mencionado. Los mayores productores son China, Estados Unidos, India y Turquía. En sur América se cultivan aproximadamente 137,991 ha (Huerta y Centeno, 2015).

A nivel mundial existen casi cuatro millones de ha sembradas con tomate, lo que representó una producción de 108.5 millones de kilogramos (FAO, 2002). En los últimos diez años, la producción mundial de tomate ha aumentado en 41.436 millones de kilos, con un aumento del 32% (Hortoinfo, 2017).

### **3.4 Producción de tomate bajo agricultura protegida**

En la actualidad se encuentran, en los principales mercados, productos hortícolas frescos procedentes de España durante todo el año, a lo que contribuyen de forma

decisiva las producciones bajo invernadero (Fernández *et al.*, 2006), de las cuales la mayor superficie de cultivo con hortalizas en condiciones protegidas se encuentra en Andalucía, seguida de R. Murcia, Extremadura, Canarias, C. Valencia y Galicia, con 56,580, 5,765, 4,300, 3,179, 2,777 y 2,555 ha, respectivamente, aunque en total se siembran 78,407 (Melián *et al.*, 2008).

Aunque la industria de los invernaderos nació y se desarrolló en Europa, para principios de los 80 empezó a tomar impulso en América, especialmente en Canadá y algunas regiones de Estados Unidos. En México, aunque desde los 70 nacen en el altiplano, con flores (sobre todo en los estados de Ciudad de México y de Morelos), es a finales de los 90 cuando comienzan a desarrollarse en forma importante en la producción intensiva de hortalizas, pasando de 1998 al 2006 de 600 a más de 6,500 ha (Garza y Molina, 2008).

La cubierta predominante en la agricultura protegida en México, con 47% es la de plástico, 50% de malla sombra, vidrio 2% y 1% de otro tipo de material, tipo de agricultura en la que el tomate ocupa el 70% del volumen producido en invernadero, el pepino 10%, el pimiento 5% y otros cultivos concentran un 15% (Destenave, 2007).

Actualmente la tendencia para producir tomate es cultivar a éste bajo invernadero, ya que con dichas estructuras se mejoran las condiciones ambientales para incrementar la bioproductividad, lográndose rendimientos de tomate de 300 a 500 t ha<sup>-1</sup> por año (Castilla, 2003).

### 3.5 Clasificación taxonómica

El tomate (*Solanum lycopersicon*) es una planta dicotiledónea.

Tribu	<i>Solanea.</i>
Género	<i>Solanum</i>
Especie	<i>lycopersicon .</i>
Clase	<i>Dicotyledoneas</i>
Orden	<i>Solanales</i>
Familia	<i>Solanaceae</i>
Subfamilias	<i>Solanoideae</i>

(Esquinas y Nuez, 2001)

### 3.6 Morfología

#### 3.6.1 Sistema radicular

El tomate está constituido por la raíz principal, las raíces secundarias y las adventicias. Generalmente se extiende superficialmente sobre un diámetro de 1.5 m y alcanza más de 0.5 m de profundidad; sin embargo, el 70% de las raíces se localizan a menos de 0.20 m de la superficie del suelo (Pérez *et al.*, 2004).

#### 3.6.2 Tallos y hojas

El tallo del tomate es anguloso, recubierto en toda su longitud de pelos perfectamente visibles, muchos de los cuales, al ser de naturaleza glandular, le confieren a la planta un color característico (Maroto, 2002). En algunas variedades el tallo se prolonga por un pequeño número de nudos solamente (variedades de crecimiento determinado); en otras se alarga durante toda la temporada de crecimiento (variedades de crecimiento indeterminado). Las hojas compuestas, relativamente grandes, bien desarrolladas, con folíolos relativamente anchos en

algunas variedades y más o menos angostos en otras. Tienen pelos glandulares que, cuando se rompen, liberan el olor y tinte característicos de la planta (Nuez, 2001).

### **3.6.3 Flores, frutos y semillas**

La flor de tomate es perfecta, regular e hipógina y consta de 5 o más sépalos, de 5 ó más pétalos dispuestos de forma helicoidal en ángulos de 135°, de un número igual de estambres que se alternan con los pétalos y de un ovario bi o plurilocular (Chamarro, 2001). El fruto es una baya bi o plurilocular que se desarrolla a partir de un ovario de unos 5-10 mg y alcanza un peso final en la madurez que oscila entre los 5 y los 500 g, en función de la variedad y las condiciones de desarrollo (Chamarro, 2001). La semilla es aplanada y de forma lenticelar con dimensiones aproximadas de 3 x 2 x 1 mm y está constituida por el embrión, el endospermo y la testa o cubierta seminal (Pérez *et al.*, 2004).

### **3.7. Fenología y ciclo del cultivo**

La duración del ciclo del tomate está determinada por la variedad y por las condiciones climáticas de la zona en la cual se establece el cultivo. La fase de desarrollo vegetativo de la planta, comprende cuatro subetapas que se inician desde la siembra, seguida de la germinación; posteriormente la formación de tres a cuatro hojas verdaderas y finalmente el trasplante a campo, con una duración aproximada de 30 a 35 días. Posteriormente se produce la fase reproductiva que incluye las etapas de floración (que se inicia a los 25-28 días después del trasplante), de formación del fruto y de llenado de fruto, hasta la madurez para su cosecha, la cual se inicia en el primer racimo entre los 85 a 90 días después del trasplante. La etapa reproductiva tiene una duración de 180 días, aproximadamente. El ciclo total del cultivo es de aproximadamente siete meses (Jaramillo, 2006).

### **3.8. Temperatura en crecimiento y desarrollo de tomate**

La temperatura tiene una gran influencia en el crecimiento y desarrollo de la planta de tomate por ejemplo:

- Temperaturas menores a 0°C la planta se hiela.
- Cuando la temperatura es inferior a los 10°C y superior a los 27°C el desarrollo normal de la planta se ve afectado considerablemente.
- La temperatura para un crecimiento óptimo es entre 20 a 24°C,
- Floración: La temperatura nocturna óptima en la floración es de 16°C, mientras que la diurna es de 24°C.
- Pero con temperaturas nocturnas superiores a los 26°C y diurnas de 35°C provoca el aborto de las flores.

Para una maduración la temperatura óptima es 20°C, pero con temperaturas mayores a 30°C el fruto madura amarillo (Cuadro 1) (Garza y Molina, 2008).

**Cuadro 1. Efecto de la temperatura en el cultivo del tomate**

ETAPA DE CRECIMIENTO	TEMPERATURAS (°C)
Hielo	0
Desarrollo normal afectado	10 y 27
Óptimo desarrollo	20 a 24
Óptima diurna	18 a 21
Óptima nocturna	15 a 18
Floración diurna	23 a 26
Aborto de flores noche	(26); día (35)
Óptima maduración de fruto	15 a 22
Maduración fruto amarillo	> 30
Almacenamiento	13
Suelo mínima	12
Suelo óptima	20 a 24
Suelo máxima	34

### **3.9. Fertilización**

La necesidad de fertilizantes por parte del cultivo va a depender de la disponibilidad de nutrientes del suelo, del contenido de materia orgánica, humedad, variedad, la producción y la calidad esperada del cultivo. Por esto, las aplicaciones de fertilizantes estarán sujetas al resultado del análisis químico del suelo, análisis foliares y observaciones de campo (Jaramillo, 2006).

### **3.10. Silicio**

El silicio es uno de los elementos químicos cuyo símbolo es "Si", se encuentra en la tabla periódica en el grupo 14 o IVA. Por su abundancia ( $2,57 \times 10^5$  p.p.m.) es el segundo elemento que más se encuentra en la corteza terrestre después del oxígeno ( $4,95 \times 10^5$  p.p.m.). Este material compone alrededor del 20% de la corteza terrestre (Martínez, 2011)

El silicio (Si) a pesar de ser uno de los dos elementos más abundantes en la corteza terrestre, la acción de la meteorización hace que el silicio natural sea insuficiente para desempeñar su papel como nutriente de los cultivos, siendo necesaria una fertilización complementaria. Suelos muy meteorizados, altamente lixiviados, ácidos, con bajos niveles de silicio intercambiable son considerados pobres en silicio disponible para las plantas (Brady, 1992). El silicio es absorbido por las raíces junto con el agua de la solución del suelo y fácilmente translocado en el xilema. La cantidad de fertilizante silicatado que debe ser aplicada aún no ha sido determinada para la mayoría de suelos y cultivos, pero todo indica que cuanto mayor cantidad de silicio soluble activo esté presente, mejores serán los beneficios para el suelo y la planta (Brady, 1992).

El silicio tiene acción sinérgica con el Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Hierro (Fe), Zinc (Zn) y Molibdeno (Mo). Los seis elementos presentan una acción sinérgica que optimiza el desarrollo del cultivo y la producción de cosecha, como también se mejora la vida media de las cosechas perecedoras, El silicio reduce la lixiviación de fósforo, nitrógeno y potasio, en las áreas de cultivo agrícola, El silicio como

mejorador, puede reducir la lixiviación de nutrientes en los suelos arenosos y guardarlos en forma disponible para la planta, tales como coloides. El silicio incrementa la resistencia de la planta a la salinidad, la fertilización con silicio puede aliviar el estrés causado por la salinidad en plantas cultivadas. Aunque existen pocas hipótesis que expliquen el efecto del silicio sobre el estrés salino, los suelos subtropicales y tropicales son generalmente bajos en Si disponible en la planta y se beneficiarían de la fertilización con Si. Además, la disminución del Si en el suelo puede ocurrir en prácticas de cultivo intensivo y monocultivo continuo de cultivares de alto rendimiento. Como resultado, estos suelos son generalmente bajos en Si disponible en la planta, el arroz y la caña de azúcar producidos en rotación en suelos orgánicos y arenosos han mostrado respuestas agronómicas positivas a las aplicaciones pre plantación de escorias de silicato de calcio (Wild, 1992).

Una de las ventajas del silicio más controvertidas es la disminución de la transpiración y el aumento de la fotosíntesis, el efecto se ha asociado principalmente con la deposición de silicio en las paredes celulares.

El efecto del silicio se considera benéfico, pues actúa como un “elemento alarma” frente a condiciones de estrés hídrico, al impedir la pérdida de agua por acción de la capa de silicio. Las observaciones de campo se registraron en formatos previamente elaborados para almacenar la información obtenida durante seis meses (Hernández, 2013).

El silicio mejora la producción de forrajes para la alimentación animal. Aplicado al cultivo de alfalfa, avena, cebada, sorgo, maíz, y praderas mejora su contenido en el tejido vegetativo, minerales y proteína así como la nutrición animal que también lo requiere.

Los minerales ricos en silicio se pueden aplicar igualmente en las raciones del alimento balanceado (Hernández, 2013).

El contenido de silicio en el tejido vegetal varía considerablemente entre los cultivos. Los resultados indican que algunas especies absorben poco silicio, como es el caso

de cultivo de tomate, gerbera y lechuga. Mientras que otros se acumulan cantidades relativamente grandes en las hojas como el caso del cultivo de pepino y frijol. Sin embargo es amplia la variación en el contenido de silicio en el entorno de la raíz, la edad de las hojas en la muestras, o la edad de los cultivos (Hernández, 2013).

El hecho de que el Si quede depositado en las paredes celulares del tejido epidérmico, proporciona a la planta diversos beneficios: evita la pérdida del agua por transpiración cuticular e incrementa la elasticidad de la pared celular durante el crecimiento de la planta al interactuar con pectinas y polifenoles (Michereff, 2006).

El silicio potencializa las técnicas agrícolas modernas y mejora de manera sustentable las siguientes prácticas agrícolas: riego presurizado, ya que para disolver los minerales presentes en el suelo se requiere de la presencia continua de agua, por otro lado al aplicar la técnica del acolchado de suelos, se mejora adicionalmente la temperatura y presencia de gases como el bióxido de carbono, al estimular la producción de ácido ortosilícico, lo cual depende de su concentración en el suelo y la aplicación de minerales ricos en silicio (Viana, 2008).

En la agricultura orgánica además se tienen grandes ventajas, ya que adicionalmente el silicio, reduce la demanda de agroquímicos. El silicio aumenta la nutrición del fósforo en las plantas de un 40 a 60% e incrementa la eficiencia de la aplicación de roca fosfórica de un 100 a 200% (Viana, 2008).

Los suelos contienen cantidades significativas de Si, aunque el uso de sistemas de cultivo continuo, algunas formas no disponibles y suelos en desequilibrio biológico, hacen necesario su suministro, Los niveles de Si en los tejidos de cada especie de planta varían en relación con la disponibilidad de Si en el suelo, una de la razón más acertada es que la presencia de silicio en las plantas, hace que de las hojas y tallos se incremente la cantidad de oxígeno lo que impulsa que las plantas hacia la raíz llegando al parénquima, oxidando de esta manera la rizósfera, logrando que el Fe y Mn reducido (producto de agua en cultivo de arroz) se oxide, evitando una excesiva toma de estos elementos por parte de las plantas (Viana, 2008).

La mezcla de biosólidos como el estiércol de ganado y compostas con minerales ricos en silicio activo pueden transformar la presencia de contaminantes activos y tóxicos en materiales inertes. Además, potencializa a los elementos minerales contenidos en ellos y reduce la lixiviación, el silicio en el suelo procede fundamentalmente de la degradación de las rocas ígneas, en él se encuentra como Si y como contribuyente de muchos silicatos y minerales arcillosos. Su contenido es variable ya que hay que tener en cuenta que es, después del oxígeno, el elemento más abundante en la litosfera (Estrada, 2001).

### **3.10.1 El silicio en plantas**

En condiciones de campo, el silicio es un elemento de gran importancia que estimula el crecimiento de la planta, entendido el crecimiento como la acumulación irreversible de materia seca asociada con procesos de elongación y crecimiento celular y aumenta la disponibilidad de elementos esenciales el contrarrestar el antagonismo generado en suelos con alta saturación de aluminio y hierro (Winslow, 1992).

Los beneficios que tiene el silicio en las plantas son:

- Incrementa la productividad y la calidad de las cosechas agrícolas
- Restaura el suelo de la degradación e incrementa su nivel de fertilidad para la producción agrícola
- Incrementa la resistencia del suelo contra la erosión del viento y el agua y alas sequias.
- Neutraliza la toxicidad del aluminio en suelos ácidos
- Tiene acción sinérgica con calcio y magnesio
- Aumenta la resistencia de la planta a plagas y enfermedades
- Protege las plantas contra el ataque de enfermedades, hongos e insectos.

El silicio tiene varios efectos sobre los vegetales. Las plantas de Arabidopsis fertilizadas con silicio, al ser infectadas con hongos, presentan una infección menos severa, además de que el silicio retrasa la aparición de la enfermedad y/o reduce su incidencia, modulando y sincronizando mejor la respuesta de la planta al patógeno.

Es decir, la función del silicio no se limita a ser una barrera física (por ejemplo, los tricomas) contra las agresiones del medio, sino que tiene un papel más activo y relevante (Fauteux *et al.*, 2006).

Las evidencias muestran que las plantas que crecen en ausencia de silicio frecuentemente son más débiles estructuralmente, y tienen menor tamaño, desarrollo, viabilidad y su reproducción es anormal; son más susceptibles a estrés abiótico así como a la toxicidad por metales, son más fácilmente atacadas por organismos patógenos, insectos fitófagos y mamíferos herbívoros (Raya y Aguirre, 2012).

El silicio tiene una acción dinámica en la relación suelo-agua-planta, este elemento es removido del suelo en grandes cantidades, este se encuentra presente en forma soluble y sólida dentro de los tejidos de las plantas.

### **3.10.2 El silicio como elemento benéfico en la fisiología de la planta**

Los efectos del silicio en la fisiología del cultivo no son muy claras, sin embargo existen referencias sobre lo siguiente: ha sido relacionado con resistencia a la planta a enfermedades fungosas, ataque de insectos, mantenimiento de hojas y tallos erectos, eficiencia en el uso del agua, incremento en los rendimientos del cultivo y transpiración del fósforo (Hernández, 2013). En cuanto a las funciones fisiológicas incluyen la reducción de la evotranspiración, el aumento del suministro de oxígeno a la raíz mediante el fortalecimiento de las paredes del canal de aire, las interacciones con el fósforo y el mejoramiento de la toxicidad de los metales (Hodson y Evans, 1995). En condiciones de campo, el silicio puede estimular el crecimiento (entendido como la acumulación irreversible de materia seca, que se asocia a procesos de elongación y crecimiento celular) (Loaiza, 2003), y la productividad por aumentar la disponibilidad de elementos como el P, Ca, Mg, K y B, al contrarrestar el antagonismo generado en suelos con alta saturación de aluminio y hierro (Epstein y Bloom, 2005).

De acuerdo Epstein y Blom (2005), el silicio es un elemento que estimula el crecimiento de algunas plantas, por lo que es considerado como altamente benéfico, incluso esencial para un grupo de ellas. Cabe mencionar que el silicio normalmente, no es considerado como un elemento esencial en la nutrición de las plantas, sin embargo, diversos estudios han mostrado que puede influir en forma positiva en el crecimiento de las plantas y el rendimiento (Balakhnina y Borkowska, 2013).

El silicio es una parte integral de las plantas. La distribución del silicio entre los órganos de la planta no es igual y puede variar desde el 0,001% en la pulpa del fruto hasta el 100/15% en el tejido epidérmico. Las plantas tienen un mecanismo especial para la captación selectiva de ácido monosilícico de la solución del suelo (Matichenkov, 2008).

Los tejidos vegetales están caracterizados por una concentración extremadamente alta de ácido mono y polisilícico en la savia y tiene la posibilidad de una rápida redistribución de este elemento. El silicio proporciona funciones de protección en las plantas a niveles mecánicos, fisiológicos, químicos y bioquímicos (Matichenkov, 2008).

### **3.10.3 Silicio como mecanismo de defensa**

Se ha demostrado que el silicio tiene efectos benéficos en los cultivos, ya que al ser absorbida por la planta se transforma en cristales de silicio, formando una barrera protectora que presenta una resistencia mecánica al ataque de enfermedades e insectos. Las plantas absorben Si como ácido silícico y evaluaciones sobre la base de materia seca indican concentraciones del elemento entre 0,1-10 % en cultivos, los efectos del silicio han sido relacionados con: resistencia de la planta a enfermedades fungosas, ataque de insectos, mantenimiento de hojas y tallos erectos (resistencia al vuelco), eficiencia en el uso del agua, incremento en los rendimientos del cultivo y translocación del fósforo (Epstein, 1994).

El silicio es absorbido en un rango de pH de 2 hasta 9 en forma energéticamente pasiva (Epstein, 1994). Siendo tomado por la raíces en la solución como ácido

monosilícico  $\text{Si}(\text{OH})_4$ , para ser acumulado en las células epidermales que las impregna en una fina capa ( $2.5\ \mu\text{m}$ ) y al asociarse con pectinas y polifenoles en la pared celular (Epstein, 1994). Pueden ser barreras efectivas a la pérdida de agua, transpiración cuticular e infecciones fungosas; sin embargo, a medida que se acumula este ácido en forma de silicio de 87 a 99%, aun cuando el efecto es casi netamente físico (por el silicio), se ha sugerido que la asociación del silicio con los constituyentes de la pared celular los hace menos susceptibles a la degradación enzimática que acompaña la penetración de la pared celular por las hifas de los hongos (Tisdale y Nelson, 1993).

El silicio no es considerado esencial para los vegetales superiores porque no responde a los criterios directos e indirectos de la esencialidad Malavolta, (2006). A pesar de eso, su absorción puede ocasionar efectos benéficos para algunos cultivos como son resistencia a plagas, tolerancia a la toxicidad por metales pesados, al estrés hídrico y salino, menor evapotranspiración, promoción del crecimiento y modulación en leguminosas, efecto en la actividad de las enzimas y en la composición mineral, mejoría de la arquitectura de las plantas, reducción del encamado de las plantas y por consiguiente aumento de la tasa fotosintética (Epstein, 1999; Vieira da Cunha *et al.*, 2008).

Los fisiólogos vegetales no consideran al Si como un elemento esencial para las plantas; sin embargo, se ha reportado que la presencia de éste beneficia los cultivos, por inducción de resistencia y protección contra diversos factores ambientales bióticos y abióticos, en el caso de incrementar la resistencia al ataque de patógenos e insectos, el papel del Si ha sido atribuido en parte a su acumulación y polimerización en las paredes celulares, lo cual constituye una barrera mecánica contra el ataque; sin embargo, se ha demostrado que el tratamiento de las plantas con Si trae como consecuencia la acumulación de compuestos fenólicos, lignina y fitoalexinas (Epstein, 1999).

### 3.10.4. Implicaciones del silicio en la fisiología de las plantas

Los efectos beneficiosos del silicio en el crecimiento y desarrollo de las plantas son escasos en condiciones óptimas, sin embargo, es sumamente importante en situaciones de estrés. Esto es debido a que el silicio se deposita en las paredes celulares de los vasos del xilema y previenen que se compriman en condiciones de alta transpiración causada por la sequía a estrés térmico (Raya y Aguirre, 2009). Se ha utilizado el silicio para mejorar el crecimiento de las plantas y los rendimientos, particularmente bajo condiciones de estrés, así también con diferentes respuestas fisiológicas como son: mejoramiento en el balance de nutrientes, reducción de la toxicidad de minerales, incremento en las propiedades mecánicas de los tejidos vegetales, y un aumento en la resistencia a otros diversos factores abióticos (y factores bióticos).

La función del silicio no se limita a ser una barrera física (por ejemplo, los tricomas) contra las agresiones del medio, sino que tiene un papel más activo y relevante (Fauteux *et al.*, 2006). Se ha reportado que las plantas tratadas con silicio y expuestas a plagas atraen más enemigos naturales de estas plagas, que las plantas no tratadas (Kvedaras *et al.*, 2010).

Según Viana (2008), el Dióxido de Silicio ( $\text{SiO}_2$ ) que se acumula bajo la cutícula de las hojas, tallos y raíces en forma de cristales de silicio, es posible que proviene del proceso de la transpiración de las plantas, esa agua producto del proceso mencionado puede provenir del Ácido Silícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), según la reacción  $n(\text{Si}(\text{OH})_4) \rightarrow n(\text{SiO}_2) + 2n(\text{H}_2\text{O})$ , formándose el  $\text{SiO}_2$ , el cual produce resistencia a la entrada de las hifas de los hongos y a los aparatos bucales de los insectos, minimizando el ataque de los insectos chupadores y de los masticadores en sus primeros instares, dificultando de esta manera los daños en general Datnoff *et al.* (1990 y 1991) y Osuna-Canizales *et al.* (1991) mencionados por Fihlo *et al.* (2000), indican que la incidencia de las enfermedades es menor cuando la concentración de Si en el tejido vegetal es mayor.

Una planta bien nutrida posee varias ventajas en cuanto a su resistencia a las plagas con relación a una planta con deficiencia nutricional, y dentro de los elementos minerales, el silicio es considerado un elemento benéfico para las plantas pues contribuye a la reducción de la intensidad del ataque del agente nocivo en varios cultivos (Hans,1995).

### **3.10.5 Silicio como fertilizante**

La fertilización con minerales ricos en silicio promueve la transformación del fósforo no disponible para la planta en formas asimilables y previene la transformación de fertilizantes ricos en fósforo en compuestos inmóviles. Fertilizantes de lenta liberación se pueden fabricar con materiales ricos en fósforo en compuestos inmóviles. Fertilizantes de lenta liberación se pueden fabricar con materiales ricos en silicio. El silicio permite la colonización por microorganismos simbióticos como bacterias y hongos (Salinas, 1976).

Los fertilizantes con silicio asimilable, se presentan como alternativa para mitigar el impacto de los factores que contribuyen a la desertificación y contribuyen con la sostenibilidad de la agricultura intensiva en zonas áridas y semiáridas, así como en cultivos hidropónicos (Quero, 2007).

El Si refuerza en la planta su capacidad de distribución de carbohidratos requeridos para el crecimiento y producción de cosecha, tiene acción sinérgica con el Calcio, el Magnesio y el Potasio, mejorando la vida media de las cosechas percederas, incrementando la eficiencia de las prácticas de postcosecha (Quero y Cárdenas, 2007).

En las gramíneas, el Si se acumula en cantidades mayores que cualquier otro elemento inorgánico (Agnusdey, 2007), excepto en ciertas algas, diatomeas y equisetáceas (cola de caballo), donde no es considerado un elemento esencial para estas plantas.

Según Reina (2010), la presencia de Si en las plantas hace que en las hojas y tallos, se incremente la cantidad de oxígeno que expulsan las plantas hacia la raíz llegando al parénquima, oxidando de esta manera, la rizósfera y haciendo que el Fe y Mn reducido se oxide. De esta forma, se evita una toma excesiva de estos elementos, que pueden llegar a ser tóxicos para la planta.

Se ha observado un efecto benéfico del Si sobre el crecimiento y desarrollo de plantas de diversas especies, cultivadas en condiciones de estrés abiótico o biótico (Epstein, 1999).

La fertilización mineral con silicio tiene un doble efecto en el sistema suelo-planta. Primeramente, la nutrición con silicio al cultivo refuerza en la planta su capacidad de almacenamiento y distribución de carbohidratos requeridos para el crecimiento y producción de cosecha (Michereff, 2006).

Los fertilizantes con silicio asimilable, se presentan como alternativa para mitigar el impacto de los factores que contribuyen a la desertificación y contribuyen con la sostenibilidad de la agricultura intensiva en zonas áridas y semiáridas, así como en cultivos hidropónicos (Michereff, 2006).

La aplicación de fertilizantes minerales con silicio es una alternativa que se puede considerar bajo un esquema de agricultura sustentable y altamente efectiva en cualquier tipo de suelo, sobre todo en aquellos donde el pH es inferior a 6.0 (Rivera *et al.*, 2010).

Las plantas que crecen en ausencia de Si, frecuentemente son más débiles y su crecimiento, desarrollo, viabilidad y reproducción son anormales, son más susceptibles al estrés abiótico, como toxicidad por metales, fácilmente invadidas por organismos patógenos, insectos fitófagos y mamíferos herbívoros. La mayoría de estas respuestas se observan en plantas que crecen en suelos pobres en Si (Epstein, 1994).

Las plantas cultivadas en ausencia de silicio son más susceptibles a estrés abiótico como toxicidad por metales y salinidad, son más fácilmente atacadas por organismos patógenos, insectos fitófagos y mamíferos herbívoros (Raya *et al.*, 2012).

La cantidad de fertilizantes silicatos que debe ser aplicada aún no ha determinada para la mayoría de suelos y cultivos, pero todo indica que cuanto mayor cantidad de silicio soluble activo este presente, mejores serán los beneficios para el suelo y la planta (Brady, 1992).

### **3.10.6. Relación del fósforo con el silicio**

Se ha demostrado que el fósforo, como nutrimento en las primeras etapas de desarrollo del cafeto, es el responsable de formar cafetos vigorosos y con buen sistema de raíces, y promotor de la floración y desarrollo del fruto en la etapa de producción, la diferencia es que la reducción de la disponibilidad del silicio ocurre debido a las pérdidas por lixiviación, en tanto que la disponibilidad del fósforo disminuye por la fijación (Caicedo y Chavarriaga, 2007).

La gran mayoría de los suelos tienen gran poder de fijación del fósforo; lo que los hace grandes competidores con las plantas por el fósforo suministrado por el fertilizante. El elevado grado de “intemperización” de los suelos (tropicales) reduce el tenor de silicio disponible para las plantas, así como la disponibilidad de fósforo (P) en el suelo (Caicedo y Chavarriaga, 2007).

El aporte al suelo de fertilizantes silícicos solubles incrementa la asimilación del fósforo por la planta, posiblemente debido a un intercambio de los fosfatos absorbidos a los hidróxidos por silicatos.

En suelos ácidos pobres en silicio resulta muy apropiado adicionar escorias básicas de defosforilación, las cuales junto al aporte de cantidades variables de Ca, Mg, Mn y Si sirven para una mejora del pH del suelo y para favorecer la asimilación del fósforo (Navarro y Navarro, 2000).

### **3.10.7. El silicio en la prevención y control de plagas y enfermedades**

Muchas de las investigaciones realizadas señalan el papel activo que desempeña el Silicio en las plantas y sugiere que su presencia podría ser una señal para inducir reacciones de defensa frente a enfermedades de plantas.

En gramíneas y dicotiledóneas, la mayor parte del silicio permanece en el apolaste de las hojas y es depositado tras la evaporación del agua principalmente en las paredes externas de las células epidérmicas de ambas caras de las hojas.

Este proceso (que se denomina solidificación), produce un efecto repelente, pues cristalizando sobre la superficie de las hojas hace que se vuelvan urticantes para las partes bucales de los insectos y nematodos (Urrutia *et al.*, 1993).

### **3.10.8. Papel del silicio en la resistencia de las plagas agrícolas**

En el caso de incrementar la resistencia al ataque de insectos, el papel del Si ha sido atribuido en parte a su acumulación y polimerización en las paredes celulares, lo cual constituye una barrera mecánica contra el ataque; sin embargo, se ha demostrado que el tratamiento de las plantas con Si trae como consecuencia cambios bioquímicos.

Favorecen la mayor lignificación de los tejidos, la disminución en la calidad nutricional y la digestibilidad, todo lo cual genera, consecuentemente, un decrecimiento en la preferencia de los insectos por las plantas su efecto sobre las plantas y sobre los agentes biológicos que las atacan, no son suficientes para interferir de manera significativa en la incidencia de plagas y en la prevención de sus daños, por lo que se requiere la realización de más investigaciones. En la resistencia de las plantas a enfermedades, existen informes que indican una relación directa entre la acumulación del Si en el tejido vegetal y la disminución del ataque de patógenos en la planta (Dan y Muir, 2002).

La función del silicio no se limita a ser una barrera física (por ejemplo, los tricomas) contra las agresiones del medio, sino que tiene un papel más activo y relevante

(Fauteux *et al.*, 2006). Se ha reportado que las plantas tratadas con silicio y expuestas a plagas atraen más enemigos naturales de estas plagas, que las plantas no tratadas (Kvedaras *et al.*, 2010).

El silicio también se ha encontrado formando parte de la pared celular de algunas bacterias como *Bacillus subtilis*, incluyendo sus esporas, que presentan una gran resistencia a condiciones ambientales adversas como la desecación y las altas temperaturas (Urrutia y Beveridge, 1993).

El silicio protege de la toxicidad del aluminio no solo a las plantas, como las coníferas, cebada, soya, sorgo, maíz, sino a la biota en general, como los peces. Se ha sugerido que el silicio soluble es esencial para los organismos vivos porque se une al aluminio (Wang *et al.*, 2004).

### **3.11. Cloro en las plantas**

El cloro es fácilmente tomado por las plantas en su forma de ión inorgánico ( $\text{Cl}^-$ ) y es altamente móvil dentro de la misma. Este elemento está involucrado en la fotosíntesis, ya que es requerido para la fotólisis del agua en el sitio de oxidación del fotosistema II, además, juega un papel importante en la regulación estomática, sirviendo de anión acompañante al potasio en su entrada y salida de las células guardas. También, está implicado en el balance de las cargas y en el ajuste osmótico dentro de las células (Welch, 1995). Otra función menos conocida tiene que ver con la división celular. En muchas plantas, la ausencia de cloro se manifiesta en una reducción del área foliar y, por tanto, en la masa seca de la planta, resultado de la disminución en las tasas de división y de extensión celular (Marschner, 1998). Sin embargo, es difícil que se presente la deficiencia de este elemento en las plantas cultivadas, porque, generalmente, el agua de riego tiene suficiente cantidad de cloro para suplir las necesidades del cultivo (López y Segovia, 1996). Entretanto, los excesos de cloruros si causan problemas. En plantas de rosa los excesos de cloruros y sodio causan necrosis y defoliaciones fuertes en las hojas viejas. Estos excesos pueden causar el agrietamiento del tallo causando alta incidencia de enfermedades (Medina, 1999).

### 3.11.1. Cloro como fertilizante

El Cl, aun cuando es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, puede causar toxicidad cuando su concentración en el tejido vegetal es excesiva (Jacoby, 1994, Al-Karaki, 2000; Zhu, 2001). Las altas concentraciones de Cl producen quemaduras en las hojas, disminuyen la fotosíntesis e inhiben la absorción de nitratos (Aslam *et al.*, 1984; Martínez y Cerdá, 1989; Zekri y Parsons, 1992).

El cloro es un micronutriente esencial para la altura de las plantas y requiere de mínimos dosis ( $1 \text{ g kg}^{-1}$ ) para incrementar la producción (Marschner, 1995). Estas cantidades pueden ser suplidas con el agua de lluvia, y la deficiencia de cloro en las plantas es raramente observada de manera natural en la agricultura. Sin embargo las altas concentraciones de Cl en los tejidos pueden ser tóxicos para la producción de las plantas y la agricultura pueden restringirlo en regiones salinas (Xu *et al.*, 2000).

El cloro, que existe en las plantas principalmente como cloruro, se distribuye en los órganos vegetativos tales como los brotes y las hojas. La cantidad de  $\text{Cl}^-$  en los órganos nutricionales es más del 80% de la cantidad total, y se acumula más en las hojas de la capa inferior o en las hojas de la tercera edad que las superiores o las más jóvenes (Li *et al.*, 2002). El cloro en las plantas se acumula principalmente en el cloroplasto, y es esencial para la función fotosintética. La planta con deficiencia de cloro mostró síntomas de marchitez, clorosis, necrosis y una decoloración de bronce inusual (Li *et al.* 2002)

La respuesta de rendimiento a Cloruro sigue el concepto de respuesta de cultivos a nutrientes móviles. Esto significa que el rendimiento puede estar relacionado directamente con la cantidad de Cl, dado que este nutriente es el más limitante en el suelo. También es importante señalar que el Cl es móvil y está sujeto a lixiviación, por lo que los cultivos en suelos donde el suelo Cl es bajo, como los suelos arenosos y franco arenosos, se beneficiarían más del fertilizante Cl (Freeman y Girma, 2006).

### **3.11.2. Funciones fisiológicas del cloro en las plantas**

Como un nutriente que limita el crecimiento y el rendimiento, las funciones fisiológicas del Cl en plantas superiores incluyen la regulación osmótica, la regulación estomática, la evolución del oxígeno en la fotosíntesis, la resistencia a las enfermedades y la tolerancia. A excepción de algunas especies de plantas, las concentraciones medias de cloro en las plantas están en el rango de 2-20 g kg<sup>-1</sup> de materia seca (MS), que es fácil de cubrir con riego, lluvia, fertilizantes y contaminación del aire. A nivel mundial hay mucha más preocupación por la toxicidad Cl que por la deficiencia en las plantas. Sin embargo, las prácticas de evitar fertilizantes que contienen sales metálicas de Cl pueden aumentar la posibilidad de deficiencia de Cl en algunas áreas, especialmente en suelos arenosos de alto rendimiento con baja materia orgánica (Chen *et al.*, 2010).

### **3.11.3. Efecto de cloro en la producción de las plantas**

Respecto al cloro, este elemento tiene efectos en la producción, razón por la cual el cloruro de sodio u otros cloruros han sido a experimentar por varios años. Con el objetivo de determinar si el cloro es un nutriente indispensable para la altura de las plantas y estudiar más sobre la acción estimulante en la producción (Garner *et al.*, 1929). Los fertilizantes Cl<sup>-</sup> pueden aumentar su rendimiento, y para el algodón, el fertilizante Cl puede mejorar la calidad de la fibra si el suelo es deficiente en C (Chen, 2010).

Díaz-Zorita *et al.* (2004), informaron que al aplicar 253 kg·ha<sup>-1</sup> de KCl en trigo (*Triticum aestivum* L.), observaron, 7% de incremento de rendimiento de grano sobre el control sin aplicación de Cl.

Se concluye que el KNO<sub>3</sub> puede ser reemplazado total o parcialmente (dependiendo de la calidad del agua) por KCl en la producción de tomate mientras se mejora la calidad de los frutos (Chapagain *et al.*, 2011).

Respecto a la movilidad del, este no es retenido en un suelo arcilloso, debido a las cargas negativas de las arcilla. Por esta razón Cl es móvil en el suelo y fácilmente lixiviado donde la lluvia y el riego supera la evapotranspiración (Chapagain *et al.*, 2011).

### **3.12. Antagonismo de elementos**

Los estudios sobre arroz, soja, cabaña, fresa, maní y trigo de primavera mostraron que el Cl tiene el efecto de aceleración o antagonismo a otros iones, por ejemplo, los contenidos de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), ácido fosfórico ( $\text{H}_2\text{PO}_4$ ) y  $\text{K}^+$  en las plantas se encontraron afectados por la concentración de  $\text{Cl}^-$ , y Cl tiene un efecto extremadamente competitivo sobre la absorción de  $\text{NO}_3^-$  (Li *et al.*, 2002, Huber y Watson, 1974). Respecto al antagonismo o aceleramiento del Cl a otros iones, según informes de Ma *et al.* (1993), esto sigue siendo discutible para el elemento fósforo, ya que la aplicación de fertilizantes que contenían Cl no disminuyó P en la papa cultivada en el suelo rico en P, y las concentraciones de P en hojas y tallos más viejos incluso aumentaron. Wang *et al.* (1990), sugirieron que el Cl puede afectar la ingesta de P sólo cuando la concentración de Cl es superior a  $400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Los efectos de Cl sobre K también dependen del nivel de suministro externo de Cl. Incluso bajo niveles bajos de suministro de Cl externo, las plantas absorben más  $\text{K}^+$  para equilibrar el contenido de  $\text{Cl}^-$  cargado negativamente, sin embargo, cuando el nivel de Cl es lo suficientemente alto como para ser tóxico, la absorción de  $\text{K}^+$  disminuye debido al metabolismo celular desordenado (Smith *et al.*, 1987).

El cloro ocurre predominantemente como Cl en el suelo, anión no forma complejos fácilmente y, dado que el intercambio en silicatos de capa en arcillas del suelo es predominantemente cargado negativamente,  $\text{Cl}^-$ , tiende a ser repelido de las partículas del suelo (Bohn *et al.*, 1979). La deficiencia de cloro causa el marchitamiento de las hojas, seguido por clorosis, bronceado y, por último, necrosis. Las raíces se convierten en atrofiado y el desarrollo de los laterales se suprime. Las frutas disminuyen en número y tamaño. Los síntomas de deficiencia son observados

cuando el tejido tiene una concentración aproximadamente entre 0.1 a 5-7 mg g<sup>-1</sup> de Peso (Xu *et al.*, 2000).

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en el campo experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, ubicada a 24° 37' 29" LN y 107° 26' 36" LO, en Sinaloa, México. Durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2016-2017.

### Primer experimento

La siembra se realizó el 12 de octubre de 2016 en charolas de poliestireno con 242 cavidades rellenas de peat moss, se utilizó tomate F<sub>3</sub> y se depositó una semilla por cavidad. Las plántulas se regaron con la frecuencia necesaria y se fertilizaron con 1.0 g de N L<sup>-1</sup> tomado de urea. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y diez tratamientos: 20, 30 y 50 mg de Si L<sup>-1</sup>, 20, 30 y 50 mg de Cl L<sup>-1</sup>, 20:20, 30:30 y 50:50 mg v/v de Si:Cl L<sup>-1</sup>, más el testigo fertilizado sólo con N. Las dosis se aplicaron mediante el riego por decantación manual sobre la superficie del sustrato contenido en las charolas de poliestireno, ésta se realizó sólo una vez cuando las plántulas tuvieron bien definida la primera hoja verdadera. En las plántulas testigo sólo se utilizó agua. A los 15 días después de la aplicación de los tratamientos, se evaluó el verdor con un Spad 502 en la parte media de una hoja de cada planta, en una muestra de 20 plantas seleccionadas al azar. La altura de plántulas se midió con una regla de 30 cm, desde la base del tallo hasta la yema apical de la misma. El área foliar se determinó con una cinta métrica, al medir largo y ancho de la primera hoja verdadera, y se utilizó la fórmula  $A = 0.35 \cdot L^2 - 5.31 \cdot L + 57.6$  propuesta por de **Blanco y Folegatti, (2003)**. El peso de materia seca de raíz y parte aérea de las plántulas se hizo después del secado en estufa a 70 °C durante (72 h), con báscula de precisión.

### Segundo experimento

Se sembró tomate F<sub>3</sub> bajo condiciones de casa sombra en noviembre de 2016, en un suelo vertisol crómico. La separación entre plantas fue de 25 cm. Las parcelas experimentales constaron de dos surcos de 32 m de largo, con separación de 1.6 m entre surcos, se utilizó el sistema de riego por goteo. Se utilizó un diseño

experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y nueve tratamientos: 20, 30 y 50 mg de Si L<sup>-1</sup>, 20, 30 y 50 mg de Cl L<sup>-1</sup>, 20:20 y 30:30 mg v/v de Si:Cl L<sup>-1</sup>, y un testigo fertilizado sólo con N tomado de urea y fertilizante foliar (Micro min 20-30-10). Las dosis se diluyeron en 3.0 L de agua y se aplicaron sólo una vez en el fondo de un surco de 5.0 cm de profundidad, construido manualmente con un triángulo metálico a un lado de la hilera de plantas, cuando éstas tuvieron cinco hojas verdaderas, en tanto que las plantas testigo sólo recibieron 3.0 L de agua. Posteriormente todas las parcelas experimentales fueron manejadas con riego por goteo durante una hora. Cada unidad experimental constó de 20 plantas seleccionadas al azar. Las variables de estudio a evaluar fueron: verdor que se determinó con un Spad 502, en la parte media de dos folíolos de una hoja fisiológicamente madura y sin deterioro en cada planta. La altura de las plantas de tomate se midió con una cinta métrica, desde la base del tallo hasta la yema apical de la misma. El área foliar se evaluó en la séptima hoja verdadera a los 20 días después de la aplicación de silicio y se utilizó la fórmula=  $0.347 (L.W) - 10.7$  de Blanco y Folegatti, (2003). Se cosechó tres veces por semana, se registraron los °Brix y el pH de los frutos, así como el rendimiento por hectárea con base al peso de frutos, los cuales deberían tener no menos de 3.2 cm de diámetro y 12.7 cm de longitud.

Los datos recabados se analizaron estadísticamente con el paquete estadístico SAS, y se hizo comparación múltiple de medias con la prueba de Duncan ( $\alpha \leq 0.05$ ).

## V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el Cuadro 2 se puede notar que las plantas cultivadas en casa sombra, en verdor no se observaron diferencias estadísticas, sin embargo las plantas tratadas con Si en dosis de 20 y 30 mg L<sup>-1</sup>, incrementaron ligeramente su verdor (5 y 10%, respectivamente), comparados con el promedio del testigo. En altura se mostraron diferencias estadísticas, aunque el mayor incremento ocurrió en las plantas tratadas con Si en dosis de 30 mg L<sup>-1</sup> y en aquéllas cultivadas con 20:20 mg de Si:Cl la altura disminuyó. En área foliar también ocurrieron diferencias estadísticas significativas entre los promedios que se indican en el Cuadro 2, de tal manera que las plantas testigo superaron a las tratadas con Si, Cl o la combinación de ambos elementos. La materia seca de raíz se expresó con diferencias estadísticas, de tal manera que las dosis 30:30 mg L<sup>-1</sup> de Si:Cl incrementaron la materia seca en 127 % en relación al testigo. En peso seco de parte aérea las plántulas tratadas con las dosis de 30 mg L<sup>-1</sup> de Si y 30:30 mg L<sup>-1</sup> de Si:Cl fueron estadísticamente iguales al testigo con valores porcentuales superiores al testigo en 8 y 3 %, respectivamente.

**Cuadro 2. Verdor, altura, área foliar, materia seca de raíz y parte aérea de plántulas de tomate.**

Tratamientos	Verdor (SPAD)	Altura (cm)	Área foliar (cm <sup>2</sup> )	Materia seca de raíz (g)	Materia seca de parte aérea (g)
20 mg L <sup>-1</sup> de Si	37.13 a	8.50 cde	37.30 abc	0.21 ab	0.31 bc
30 mg L <sup>-1</sup> de Si	38.89 a	10.47 a	35.32 c	0.19 ab	0.39 a
50 mg L <sup>-1</sup> de Si	35.68 a	8.90 bcd	35.77 c	0.15 ab	0.29 cd
20 mg L <sup>-1</sup> de Cl	34.68 a	8.60 cde	37.28 abc	0.23 a	0.27 cd
30 mg L <sup>-1</sup> de Cl	35.49 a	8.61 cde	36.39 bc	0.10 b	0.24 d
50 mg L <sup>-1</sup> de Cl	35.78 a	9.11 cd	35.67 c	0.24 a	0.34 abc
20:20 mg L <sup>-1</sup> de Si-Cl	35.74 a	7.70 e	38.00 ab	0.12 b	0.22 d
30:30 mg L <sup>-1</sup> de Si-Cl	34.88 a	9.91 ab	35.97 c	0.25 a	0.37 ab
50:50 mg L <sup>-1</sup> de Si-Cl	35.47 a	8.03 cde	38.59 a	0.12 b	0.23 d
0 mg L <sup>-1</sup> (testigo)	35.28 a	7.83 de	38.51 a	0.11 b	0.36 ab

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, Duncan (P≤0.05).

## Segundo experimento

En el Cuadro 3 se puede notar que en verdor, las plantas cultivadas en casa sombra, se observaron diferencias estadísticas, de tal manera que las plantas tratadas con Si, Cl y Si:Cl en dosis de 20, 20 y 30:30 mg L<sup>-1</sup> respectivamente, incrementaron ligeramente el verdor (0.5, 3 y 2%, respectivamente), comparados con el promedio del testigo.

En altura se mostraron diferencias estadísticas, aunque el mayor incremento ocurrió en las plantas testigo y en aquéllas cultivadas con 30:30 mg de Si:Cl, con el resto de los tratamientos la altura disminuyó.

En área foliar también ocurrieron diferencias estadísticas significativas entre los promedios que se indican en el Cuadro 3, de tal manera que las plantas tratadas Si:Cl en dosis de 30:30 mg L<sup>-1</sup> tuvieron un incremento de 11% en comparación al testigo, el resto de las dosis decrecieron en área foliar en un 4-39%.

El rendimiento se expresó con diferencias estadísticas (Cuadro 3), pero en relación al testigo las plantas tratadas con Cl en dosis de 50 mg L<sup>-1</sup> representaron incrementos porcentuales superiores en un 3%. El resto de las dosis obtuvieron menor rendimiento, que oscilaron en un 5-27%.

**Cuadro 3. Crecimiento de tomate F<sub>3</sub> bajo condiciones de casa sombra.**

Tratamientos	Verdor (Spad)	Altura (cm)	Área foliar (cm <sup>2</sup> )	Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )
20 mg L <sup>-1</sup> de Si	49.85 abc	68.00 bcd	308.66 bc	23.21 a
30 mg L <sup>-1</sup> de Si	47.19 c	73.47 b	335.95 ab	23.20 a
50 mg L <sup>-1</sup> de Si	48.12 bc	53.87 e	214.61 d	17.84 b
20 mg L <sup>-1</sup> de Cl	51.12 a	63.47 cd	282.12 bcd	23.22 a
30 mg L <sup>-1</sup> de Cl	48.46 abc	71.83 b	300.18 bc	21.49 ab
50 mg L <sup>-1</sup> de Cl	50.24 ab	70.03 bc	302.33 bc	25.14 a
20:20 mg L <sup>-1</sup> de Si-Cl	48.37 abc	62.70 d	233.57 cd	21.75 ab
30:30 mg L <sup>-1</sup> de Si-Cl	50.78 ab	80.13 a	390.57 a	21.75 ab
0 mg L <sup>-1</sup> (testigo)	49.56 abc	81.40 a	350.49 ab	24.50 a

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, Duncan ( $P \leq 0.05$ ).

Los °Brix de frutos cosechados de las plantas tratadas con Si, Cl o Si:Cl, se incrementaron con respecto al testigo (Cuadro 4); sin embargo, el mayor incremento (9%) ocurrió en las plantas cultivadas con Cl en dosis de 20 mg L<sup>-1</sup>, siguiéndole Cl y Si en dosis de 30 y 50 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, los °Brix promedios de frutos cosechados de las plantas cultivadas con combinaciones de Si-Cl en dosis de 30:30 mg L<sup>-1</sup>, fueron estadísticamente iguales a los del testigo, aunque en valores absolutos tuvieron decrementos de 6%. Aparentemente lo anterior indica que las dosis Si y Cl, por si solos ocasionan efectos individuales superiores a los que induce con la combinación de ambos elementos, contrariamente a lo que se observó en los °Brix

Los promedios de pH variaron en los frutos de las plantas cultivadas con las diferentes dosis de Cl, Si o con las de ambos nutrientes a la vez, donde las plantas testigo incrementaron los niveles de pH.

**Cuadro 4. ° Brix y pH de frutos de tomate cultivado bajo condiciones de casa sombra**

Dosis	° Brix	pH
20 mg L <sup>-1</sup> de Si	3.65 abc	4.38 abc
30 mg L <sup>-1</sup> de Si	3.73 ab	4.34 ab
50 mg L <sup>-1</sup> de Si	3.78 ab	4.37 bc
20 mg L <sup>-1</sup> de Cl	3.89 a	4.39 ab
30 mg L <sup>-1</sup> de Cl	3.79 ab	4.41 ab
50 mg L <sup>-1</sup> de Cl	3.60 abc	4.33 bc
20:20 mg L <sup>-1</sup> de Si-Cl	3.53 bc	4.36 bc
30:30 mg L <sup>-1</sup> de Si-Cl	3.35 c	4.28 c
0 mg L <sup>-1</sup> (testigo)	3.57 abc	4.47 a

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, Duncan ( $P \leq 0.05$ ).

El ligero incremento del verdor de las plántulas y la altura, así como el incremento de peso de materia seca de raíz y de la parte aérea, son aspectos que indican la eficiencia fotosintética de las plantas tratadas con silicio. Estos resultados coinciden con lo reportado por Valente *et al.*, (2004), quienes han referido que los efectos directos del silicio se acompañan de varios efectos indirectos, que incluyen un aumento de la capacidad fotosintética, la reducción de las tasas transpiratorias, un mayor crecimiento de las plantas y una mayor resistencia mecánica de las células. Los resultados en el verdor coinciden con los de Jianpeng *et al.* (2010), ya que ellos encontraron que Si incrementa significativamente los niveles de clorofila a, clorofila b, clorofila total y carotenoides en hojas de pepino a los 10 y 15 días de ser tratadas con dicho elemento. Asimismo, con Korndörfer y Datnoff (2004), ya que ellos señalan que el silicio es un elemento que estimula el crecimiento de algunas plantas, por lo que es considerado como altamente benéfico, incluso esencial para un grupo de ellas. La respuesta de altura de las plantas cultivadas con Si tienen relación con los de Borda *et al.* (2007), toda vez que ellos descubrieron que al aplicar, en presiembra, las dosis de 100 y 50 mg L<sup>-1</sup> de ácido monosilícico, en el cultivo de avena forrajera, la

altura fue mayor hasta el momento de la cosecha, donde observaron una diferencia altamente significativa con respecto al testigo. Aunque tales diferencias las pudieron registrar a los 45 dds (etapa de macollamiento), donde aplicaron las dosis de 150, 120, 100, 50 y 0 mg L<sup>-1</sup>. Esto se puede explicar porque a partir de los 45 días se inicia de la etapa reproductiva, que al final se manifiesta con la emisión de la espiga, siendo esta mayor o menor de acuerdo a la cantidad de fotoasimilados, que depende en gran medida de la nutrición que se suministró al cultivo en su fase vegetativa. Por ello, las plantas a las cuales se les aportó Si expresaron alturas mayores al momento de la cosecha, ya que este elemento tuvo un efecto benéfico sobre el balance nutricional, principalmente de elementos necesarios en las primeras etapas, resultados similares fueron obtenidos en otros cultivos como la caña de azúcar, en la cual se encontró respuesta positiva en el aumento de tallos y número de hojas activas (Sánchez, 1981).

Respecto a cloro, los resultados de esta investigación concordaron con los referidos por Chapagain *et al.* (2011), quienes mencionan que el Cl es un micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, que es requerido en pequeñas cantidades por todos los cultivos, y su rol es ayudar en la fotosíntesis, regular las funciones de enzimas, la regulación estomática por pérdida de agua, transportar nutrientes en las plantas (Ca, Mg, K), incrementar la producción en cereales, aumentar la resistencia a las enfermedades, y con niveles adecuados del suministro, el Cl mejora los rendimientos y la calidad de muchos cultivos, como la cebolla y el algodón (Chen *et al.*, 2010). Esta coincidencia no sólo fue con las plantas tratadas con Si y Cl de manera individual, sino también con la combinación de ambos. Gomez *et al.* (2006) mencionan que mediante un manejo nutrimental, donde se agregue silicio, las plantas pueden incrementar hasta el doble de rendimiento en relación al testigo. Cabe mencionar que el cloro, que existe en las plantas es principalmente como cloruro el cual se distribuye en los órganos vegetativos tales como los brotes y las hojas. La cantidad de Cl<sup>-</sup> en los órganos nutricionales es más del 80% de la cantidad total, y se acumula más en las hojas de la capa inferior o en las hojas de la tercera edad que las superiores o las más jóvenes (Li *et al.*, 2002). Randle (2004), menciona que existen estudios sobre la cebolla, las cuales al recibir

la aplicación de Cl en el agua de riego obtuvieron un follaje verde más oscuro y más saludable. Varios estudios también se han realizado en los cultivos básicos y hortalizas en China. Estos resultados revelaron que, para el arroz, el trigo, la col, la col china y los espárragos, se puede obtener un mayor rendimiento a través de la aplicación de fertilizantes que contengan más cloro (Li *et al.*, 1989, 1991).

## VI. CONCLUSIONES

Silicio y Cloro en dosis de 20, 30 y 50 mg L<sup>-1</sup>, aplicada en riego por decantación al sustrato, cuando las plántulas presentaban la primera hoja verdadera, fueron eficaces para incrementar el verdor, altura y materia seca de raíces y en consecuencia, también mejoró la calidad de plántulas; pero cuando se aplicó a través del riego por goteo en plantas con cinco hojas verdaderas, los efectos fueron menores y contrarios a los que se observaron en las plantas testigos, sin embargo Si y Cl en dosis de 20 mg L<sup>-1</sup>, fueron eficaz para incrementar ligeramente el verdor y disminuir altura, sin embargo Cl por si sólo en dosis de 50 mg L<sup>-1</sup> fue eficaz para aumentar el verdor, disminuir altura e incrementar rendimiento. En cambio las dosis más adecuadas para incrementar ° Brix fueron Si y Cl en dosis de 20, 30 y 50 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, en relación al testigo.

## VII. LITERATURA CITADA

- Agnusdey, M. (2007). Calidad nutritiva del forraje. Grupo de producción y utilización de pasturas. Argentina. Disponible en: <http://www.produccion-animal.com>. Consultado en febrero de 2017.
- Al-Karaki, G. N. (2000). Growth, water use efficiency, and sodium and potassium acquisition by tomato cultivars grown under salt stress. *Journal of Plant Nutrition* 23: 1-8.
- Aslam H, R C Huffaker, D W Rains. (1984). Early effects of salinity on nitrate assimilation in barley seedlings. *Plant Physiol.* 76:321325.
- Atlas Agroalimentario. (2016). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. México.
- Balakhnina, T y Borkowska. A. (2013). Effects of silicon on plant resistance to environmental stresses: review. *Int. Agrophys*, 27: 225-232.
- Bao, B., Ke, L., Jiang, J. and Ying, T. (2007). Fruit quality of transgenic tomatoes with suppressed expression of LeETR1 and LeTR2 genes. *Asia Pac. J. Clin. Nutr*, 16:122-126.
- Blanco, F. F.; Folegatti, M. V. (2003). New method for estimating the leaf área index of cucumber and tomato plants. *Horticultural Brasileira, Brasilia*. 21 (4): 666-669.
- Bohn, H. L., McNeal, B. L and O'Connor, G. A. (1979). Soil chemistry. New York: John Wiley & Sons.
- Borda, O. A., Barón, F. H. y Gómez, M. I. (2007). El silicio como elemento benéfico en avena forrajera (*Avena sativa* L.): respuestas fisiológicas de crecimiento y manejo. *Agronomía Colombiana*, 25(2): 273-279.
- Brady, N. C. (1992). The nature and properties of soil. New York: *Macmillan Publishing*, 10: 750.

- Caicedo, M. L. M. y Chavarriaga, W. M. (2007). Efecto de la aplicación de dosis de silicio sobre el desarrollo en almácigo de plántulas de café variedad Colombia. *Agron*, 15(1): 27 - 37
- Castilla. (2003). Estructuras y equipamientos de invernaderos. En: Memoria del Curso Internacional de Producción de Hortalizas en Invernaderos. J Z Castellanos R, JJ Muñoz (eds). INIFAP. México. pp. 1-11.
- Chamarro, L. J. (2001). Anatomía y fisiología de la planta. In: Nuez, F. El cultivo de tomate. Editorial Mundi-prensa. Madrid, España. pp. 43-87.
- Chapagain, B. P., Wieswan, Z., Zaccai, M., Imas, P y Magen, H. (2011). Potassium chloride enhances fruit appearance and improves quality of fertigated greenhouse tomato as compared to potassium nitrate. 26:3
- Chen, Wenrong , He, Zhenli L. , Yang, Xiao E. , Mishra, Suren and Stoffella, Peter J. (2010). Chlorine nutrition of higher plants: progress and perspectives', *Journal of Plant Nutrition*, 33 (7): 943-952.
- Dann, E. K. y Muir, S. (2002). Peas grown in media with elevated plantavailable silicon levels have higher activities of chitinase and  $\beta$ 1, 3-glucanase are less susceptible to a fungal leaf spot pathogen and accumulate more foliar silicon. *Australasian Plant Pathology*, 31: 9-13.
- Destenave, J. C. (2007). La producción de cultivos en invernaderos la mejor alternativa para invertir en México. El Campo Avanza. Órgano Informativo de la Secretaría de Fomento Agropecuario, 2: 9.
- Diaz-Zorita, M., G. A. Duarte, and M. Barraco. (2004). Effects of chloride fertilization on wheat (*Triticum aestivum* L.) productivity in the sandy Pampas Region, Argentina. *Agronomy Journal* 96: 839–844.
- Dios, D. M. y Sandoval, V. M. N. (2006). Aplicaciones foliares de calcio y silicio en la incidencia de mildiu en lechuga. *Terra Latinoamericana*, 24: 91-98.

- Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the national Academy of Sciences. USA.* 91:11-17.
- Epstein, E. (1999). Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, vol. 50, no. 1, 1999, pp. 641-664, ISSN 1040-2519, DOI 10.1146/annurev.arplant.50.1.641.
- Epstein, E. y A. Bloom. (2005). *Mineral nutrition of plants, principles and perspectives. Second edition.* Sinauer Associates, Sunderland. 400 p.
- Esquinas, A. J y Nuez, V. F. (2001). Situación taxonómica, doméstica y difusión del tomate. In Nuez. *El cultivo de tomate.* Ed Mundi-Prensa España, pp.19-23.
- Estrada, G. (2001). Disponibilidad de calcio, magnesio y azufre, su análisis en suelos y plantas y su interpretación. En: los elementos secundarios (Ca, Mg, S) y el silicio en la agricultura. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Comité regional de cundinamarca y boyacá. Bogotá. Colombia, pp. 85-104.
- FAO (1996). Declaración de Roma sobre la Seguridad Alimentaria Mundial. Cumbre Mundial sobre la Alimentación. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/003/w3613s/w3613s00.htm>. Consultado en abril de 2017.
- FAO (2013). Disponible en: <http://faostat3.fao.org/download/T/TP/S>. Consultado en noviembre de 2017.
- Fauteux, F., F. Chain, F. Belzile, J. G. y Menzies, R.R. (2006). The protective role of silicon in the *Arabidopsis*-powdery mildew pathosystem. *Proceedings National Academy Science*, 103: 17554-17559.
- Fernández, Z. M. A., Pérez, A. y Caballero, P. (2006). Análisis económico de la tecnología de los invernaderos mediterráneos: aplicación en la producción del pimiento. *Información Técnica Económica Agraria*, 102 (3): 260-277.

- Filho, B. M. P., Zinder, G. H., Prabhu, A. S., Datnoff, L. E., Kornörfner, G. H. (2000). Importancia do silício para a cultura do arroz. Uma revisão de literatura. Potafos. Encarte Técnico 89.
- FIRA. (2016). Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. Panorama Agrolimentario. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200635/Panorama\\_Agroalimentario\\_Tomate\\_Rojo\\_2016.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200635/Panorama_Agroalimentario_Tomate_Rojo_2016.pdf). Consultado mayo de 2018.
- Freeman, K. W., and K. Girma .(2006). Response of winter wheat to chloride fertilization in sandy loam soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37: 1947–1955.
- Garner, W. W., McMurtrey, J. E., Jr., Bowling J. D. (1929). Role of chlorine in nutrition and growth of the tobacco plant and its effect on the quality of the cured leaf. 40(7): 626-648.
- Garza, A. M y Molina V. M. (2008). Manual para la producción de tomate en invernadero en suelo en el estado de Nuevo León. 183 p.
- Gebhardt, S. E. y Matthews, R. H. (1981). Nutritive value of foods. USDA-HNIS, Home and Garden Bull. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, U.S.A., 72p.
- Gómez, C. R., Rodríguez, M. Ma. De las N., Cárdenas S, E., Sandoval, V. M., Colinas de L. M. T. 2006. Fertilización foliar con silicio como alternativa contra la marchitez causada por *Fusarium oxysporum* (Sheld) en tomate de cáscara. Revista Chapingo serie horticultura. 1(1): 69-75
- Halvin, J. L., Tisdale, S. L., Beaton, D. J., Nelson, L. W. (2005). Soil Fertility and Fertilizers. Ed. Pearson. New Jersey, 292:3.
- Hans, W. K. (1995). The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica. Elsevier Science*, 59: 1217-1232.

- Hernández, E. I. O. (2013). Comportamiento Agronómico de poblaciones de híbridos de tomate, *Rev. Fitotec. Mex*, 36 (3): 209-215.
- Hodson, M. y D. Evans. (1995). Aluminum/silicon interactions in higher plants. *Expl. Bot.* 46(2): 161-171.
- Hortoinfo. (2017). Informe Tomate. Disponible en <http://www.hortoinfo.es/index.php/informes/cultivos/5897-inf-tomate-2017>. Consultado enero de 2018.
- Huber, D. M., and R. D. Watson. (1974). Nitrogen form and plant disease. *Annual Review of Phytopathology* 12: 139–165.
- Huerta, I. R. J. y Centeno, C. B. (2015). Mejoramiento Genético en *Solanum lycopersicum* para la resistencia al perforador del fruto *Neoleucinodes elegantalis* usando el método de retrocruzad (BACK- CROSSES). Universidad Nacional José Faustino Sanchez Carrion. Disponible en <https://es.scribd.com/document/316038005/Trabajo-de-Fitomejoramiento-2>. Consultado mayo de 2018.
- Jacoby B. (1994). Mechanisms involved in salt tolerance by plants. In: Handbook of Plant and Crop Stress. M. Pessarakli (ed). Marcel Dekker, New York. pp:97-145.
- Jaramillo N. J., Rodríguez V. P., Guzmán A. M. y Zapata M. A. 2006. El cultivo de tomate Bajo invernadero (*Lycopersicon esculentum* Mill). Boletín Técnico 2. CORPOICA. Centro de Investigación La Selva. Rio negro, Antioquia, Colombia.
- Jianpeng F., Qinghua, S., Xiufeng, W., Min, W., Fengjuan, J. y Huinu, X. (2010). Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. *Scientia Horticulturae*, 123: 521-530.
- Korndörfer, G. H. & Datnoff, L. E. (2004). “Efeito do Silício no Crescimento e Produtividade das Culturas”. [En línea] Silício na Agricultura. Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia. Disponible en: <http://sifertilizer.com>. Consultado abril de 2016.

- Kvedaras, O. I., Y Choi I. S., Gurr G. M. (2010). Silicon enhances natural enemy attraction and biological control through induced plant defences. *Bull Entomology Research* 3:367-371.
- Larry, R. & Joanne L. (2007). Genetic resources of tomato. In: Genetic improvement of solanaceous crops-Razdan MK, Mattoo AK. Enfield, NH: Science Publishers. Tomato.
- Li, J. F., Q. C. Guo, and D. Q. Wang. (1989). The effects of chlorine on the growth, yield and quality of soybean. *Chinese Journal of Soil Science* 20: 80–82 (in Chinese).
- Li, T. G., Z. D. Zhou, and Q. W. Huang. (1991). The effects of the applied ammonium chloride on the yield and quality of the vegetables. *Journal of Hunan Agricultural College* 17: 388–394 (in Chinese).
- Li, T. X., C. Q. Wang, G. R. Ma, X. Z., Zhang, and R. S. Zhang. (2002). Research progress of chloridecontaining fertilizer. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences* 15: 86–91 (in Chinese).
- Loaiza, C. (2003). Fisiología vegetal. Ed. Universidad de Caldas, Manizales. pp. 8-15.
- López-Gálvez, J. y C. Segovia. (1996). La fertilización. En: Sistemas de producción e incidencia ambiental del cultivo en suelo enarenado y en sustratos. López-Gálvez, J y J. M. Naredo (eds). Fundación Argentario-Visor Distribuciones, Madrid, p. 95-110. 20
- Ma, G. R., Wang. X and Zhong, H. (1993). The influence of chlorine on the assimilation of CO<sub>2</sub> and the absorptions of <sup>32</sup>P and <sup>15</sup>NO<sub>3</sub> in potato. *Journal of Zhejiang Agricultural University*. 19: 303-306. (In Chinese).
- Malavolta, E. Manual de nutrição mineral de plantas [en línea]. edit. Editora Agronômica CERES, Sao Paulo, Brasil. (2006). 638 p., ISBN 85-318-0047-1, [Consultado: 27 de noviembre de 2015], Disponible en: <<http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=INIA.tidad=1&expresion=mfn=022855>>.

- Maroto, J. V. (2002). Horticultura herbácea especial 5<sup>ta</sup> Ed. Mundiprensa, Madrid, España, pp. 242-243.
- Marschner H. (1995). Mineral nutrition of higher plants, 2nd edn. London: Academic Press.
- Marschner, H. (1998). Mineral Nutrition of higher plants. Academic Press, San Diego, 889 p.
- Martínez B. M. (2011). Materiales y materias primas-silicio. Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. República Argentina, 33 p.
- Martínez V, A Cerdá. (1989). Nitrate reductase activity in tomato and cucumber leaves as influenced by NaCl and N source. *J. Plant Nutr.*12:1335-1350.
- Matichenkov, V. V. (2004). "Silicon in Food". Agriculture and Environment. International Conference and Exhibition. Pushchino, Russia. Avieble from. Disponible en <Http://www.sifertilizer.com/> Consultado febrero de 2018.
- Matichenkov, V. V. (2008). Deficiencia Y Funcionalidad Del Sílice En Suelos, Cosechas Y Alimentos. SoilACE. II Conferencia Internacional Sobre Eco-Biología del Suelo y el Compost. Disponible en: [http://soilace.com/pdf/pon2008/d28/Cas/21\\_Matichenkov.pdf](http://soilace.com/pdf/pon2008/d28/Cas/21_Matichenkov.pdf). Consultado febrero de 2018.
- Medina, A. (1999). Manejo de la nutrición en el rosal después de la cosecha de San Valentin. En: Mantenimiento de plantas de Rosa, curso de actualización profesional. Lee, R. (ed.). Centro de Investigaciones y asesorías agroindustriales Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Chía, p. 31-48
- Melián, N. M. A., Ruiz, C. A. y Abadía, S. R. (2008). La horticultura de invernadero en España. Dpto. de Economía Agroambiental. 2 Dpto. de Ingeniería. Universidad Miguel Hernández.

- Michereff, S. J. (2006). Desenvolvimiento de sistemas de amostraren aplicados ao manejo de docenas de plantas”. De plantas silvestres mexicanas. *Revista Chapingo*. 31: 17-18.
- Miller, E. C., Hadley, C. W., Schwartz, S. J., Erdman, J. W., Boileau, T. W. M. y Clinton S. K. (2002). Lycopene, tomato products, and prostate cancer prevention. Have we established causality? *Pure and Applied Chemistry*. 74: 1435-1441.
- Navarro, S. y Navarro, G. (2000). Química agrícola. MundiPrensa. Barcelona, pp 424-427.
- Nesbitt, T. C. y Tanksley, S. (2002). Comparative sequencing in the genus *Lycopersicon*: implications for the evolution of fruit size in the domestication of cultivated tomatoes. *Genetics*. 162 (1): 365–366.
- Nuez, F. (2001). El cultivo de tomate. Ed. Mundi-Prensa. España, pp 167-168.
- Peralta, I. and Spooner, D. (2007). History, origin and early cultivation of tomato (*Solanaceae*). *Genet. Improv. Solanac. Crops*, 2:1-27.
- Peralta, I. E., Knapp S. y Spooner, D. M. (2006). Nomenclature for wild and cultivated tomatoes, 26: 1-12.
- Pérez, J., Hurtado, G., Aparicio., Argueta. Q., y Larín, A. M. (2004). Guía técnica del cultivo del tomate. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal km. 33 1/2, carretera a Santa Ana, ciudad Arce, La Libertad, El Salvador.
- Quero, E y Cárdenas, C. (2006). Nueva tecnología para optimizar la producción agrícola tecnificada y tradicional y mejorar la calidad agrícola de los suelos. Instituto Tecnológico Superior de Uruapan. La Basilia, Uruapan, Michoacán, México. p. 16.
- Quero, G. (2007). Fertilización para el crecimiento generativo en cultivos bajo invernadero. Disponible en: [http://assets00.grou.ps/0f2e3c/wysiwyg\\_files/filesmodule /ingenieria ag](http://assets00.grou.ps/0f2e3c/wysiwyg_files/filesmodule /ingenieria ag). Consultado febrero de 2018.

- Quero, G. y Cárdenas V. (2007). Nueva tecnología para incrementar la producción agrícola tecnificada y tradicional y mejorar la calidad agrícola de los suelos. Instituto Tecnológico Superior de Uruapan. Michoacán, México, pp. 201-205.
- Randle, W. M. (2004). Chloride requirements in onion: Clarifying a widespread misunderstanding. *Better Crops* 88: 10–11.
- Raya, P. J. C y Aguirre, M. C. L. (2012). El papel del silicio en los organismos y ecosistemas. *Conciencia Tecnológica*. 43:42-46.
- Raya, P. J. C. y Aguirre, M. C. I. (2009). Composición elemental de algunas especies p. 99.
- Reina, H. (2010). Importancia del silicio en suelo y plantas. En: [http://www.freshplaza.es/news\\_detail.asp?id=37011](http://www.freshplaza.es/news_detail.asp?id=37011). Consulta: noviembre, 2016.
- Rivera, A., Moronta, M., González, M., González, D., Perdomo, D., García, D. y Hernández, G. (2010). Producción de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays* L.) en condiciones de iluminación deficiente. *Zootecnia Tropical*. 28(1): 33 - 41.
- SAGARPA. (2010). Jitomate. Monografía de Cultivos. Subsecretaría de Fomento a los Agronegocios. México D.F. Disponible en: [http://www.sagarpa.gob.mx/agro\\_negocios/Documents/pablo/Documentos/Monografías/Jitomate.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/agro_negocios/Documents/pablo/Documentos/Monografías/Jitomate.pdf). Consultado en marzo de 2018.
- Salinas, J. G. (1976). Relaciones suelo-planta que afectan las diferencias entre especies y variedades para tolerar baja disponibilidad de fósforo en el suelo. *Ciencia y Cultura*, 28 (2):156-168.
- Sánchez, P. 1981. Suelos del trópico. IICA, San José de Costa Rica. 235 p.
- Smith, G. S., C. J. Clark, and P. T. Holland. (1987). Chloride requirement of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). *New Phytologist*. 106: 71–80.

- Spooner, D. M., W. L. A. Hetterscheid, R. G. Van Den Berg, and W. Brandenburg. (2003). Plant nomenclature and taxonomy: an horticultural and agronomic perspective. *Hort. Rev*, 28: 1-60.
- Tavares, M. P. C. (SF). Melhoramento Genético do tomateiro. Edición Asgrow do Brasil Ltda. Brasil. p 55.
- Tisdale, S. y W. Nelson. (1993). Soil fertility and fertilizers. Silicón. Quinta edición., ny, us. macmillan coll div. p.648.
- Urrutia, M. M. y Beveridge, T. J. (1993). Mechanisms of silicate binding to the bacterial cell wall in bacillus subtilis. *Journal Bacteriology*. 175:1936-1945.
- Valente, A., Morais, R., Couto, C., Correia, J. H. (2004). Modeling, simulation and testing of a silicon soil moisture sensor based on the dual-probe heat-pulse method. *Sens and Actuators*. 115: 434-439.
- Viana, J. E. (2008). Importancia del silicio en la nutrición vegetal. Agromil. Tolima, Colombia Disponible en <http://www.silicioagromil.com>. Consultado septiembre 2016.
- Vieira da Cunha, K. P.; Araújo do Nascimento, C. W y José da Silva, A. (2008). Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc for maize (*Zea mays* L.) grown on a contaminated soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, vol. 171, no. 6, pp. 849-853, ISSN 1522-2624, DOI 10.1002/jpln.200800147.
- Wang, D. Q., P. C. Guo, and X. Y. Dong. (1990). Study on the toxicity of chlorine to the crops. *Chinese Journal of Soil Science*. 21: 258–261 (In Chinese).
- Wang, X., A. Stass, y W. J. Horst. (2004). Apoplastic binding of aluminum is involved in silicon induced amelioration of aluminum toxicity in maize. *Plant Physiol*. 136:3762-3770.
- Warnock, S. J. A. (1988). Review of Taxonomy and Phylogeny of the Genus *Lycopersicon*. *HortScience*. 23(4): 669-673.

Welch, R. M. (1995). Micronutrient nutrition of plants. *Critical Reviews in Plant Science*, 14(1):4982

Wild, A. (1992). Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Mundi-Prensa, Madrid, España. p.1045.

Winslow, M. D. (1992). Silicon, disease resistance, and yield of rice genotypes under upland cultural conditions. *Crop Science*. 32:1208-1213.

Xu G, Magen H, Tarchitzky J, Kafkafi V. (2000). Advances in chloride nutrition. *Advances in Agronomy*. 68: 96-150.

Zhu, J. K. (2001). Plant salt tolerance. *Trends Plant Sci*. 6 (2): 66-71.