

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA**



Aplicación de Silicio en Tomate y su Efecto en la Calidad Nutricional

**Por
JUAN CARLOS AGUILAR GONZÁLEZ**

TESIS

**Presentada como requisito parcial para
obtener el título de:**

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México.

Junio de 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Aplicación de Silicio en Tomate y su Efecto en la Calidad Nutricional

Por

JUAN CARLOS AGUILAR GONZALEZ

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

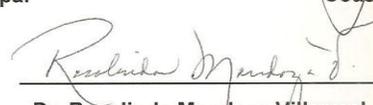
Aprobada



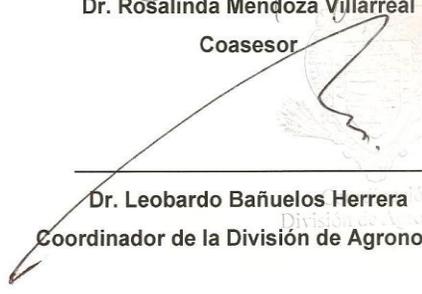
Dr. Valentín Robledo Torres
Asesor Principal



Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Coasesor



Dr. Rosalinda Mendoza Villarreal
Coasesor



Dr. Leobardo Bañuelos Herrera
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México
Junio de 2012

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por haberme regalado esta vida maravillosa y darme la oportunidad de ver concluida mi carrera profesional, por esta excelente familia que me ha regalado, y por enfrentarme con valor a cada uno de los retos que esta vida oferta día a día sin titubear y con la frente en alto.

A mi **Alma Terra Mater**, por brindarme la oportunidad de enlistarme en sus aulas por abrir las puertas de sus instalaciones, proporcionarme todo los servicios que en su momento necesite y con ello hacer más ligera mi vida universitaria. Gracias por todas esas experiencias, nociones y conocimientos que fueron implantados con su sabiduría y grandeza en mi formación académica, para ser una mejor persona y un excelente profesionalista. Eres grande “NARRO”

Al **Dr. Valentín Robledo Torres**, Primordialmente por su apoyo y tiempo incondicional, brindado durante la realización del trabajo. Por la incomparable labor que realiza con el estudiantado de la universidad, por haber promovido en mí persona, a alguien con responsabilidad y dedicación.

Al **Dr. Adalberto Benavides Mendoza**, por su colaboración y gran apoyo para el desarrollo del presente trabajo.

A la **Dra. Rosalinda Mendoza Villareal**, por su apoyo y la confianza que me otorgo en todos los procedimientos químicos y de laboratorio,

A la **Lic. Laura Olivia Fuentes Lara** por su colaboración y hacer disponible el equipo de determinación de minerales en el laboratorio de nutrición animal.

Al **T. A Carlos Alberto Arévalo Sanmiguel** encargado del laboratorio del departamento de Nutrición Animal. Por la realización del trabajo en laboratorio.

A la **T.L.Q María Guadalupe Pérez Ovalle** del laboratorio de pos cosecha por contribuir al desarrollo del trabajo en el laboratorio.

DEDICATORIA

A MIS PADRES:

Joaquín Aguilar Bastida y Paulina González Velázquez

Porque gracias a ustedes me he convertido en un hombre de bien. porque sin su ayuda no hubiese podido llegar a este momento, culminando mi etapa y lograr ser un profesionista. Porque con su amor y la paz que me regalan a cada dia puedo enfrentare las investidadas más hostiles que la vida puede ofertar, y a cada dia llenarme de bendiciones y amor infundido conmigo y mis demás hermanos, cuando se debe, corregirme cuando necesito, y amarme en todo tiempo. Por ser los mejores padres del mundo.

A TODOS MIS HERMANOS

**Samuel Aguilar “+”
Mireya Aguilar
Raúl Aguilar
Carmen Aguilar
Pepe Aguilar
Sandy Aguilar
Joaquín Aguilar**

Por demostrar su confianza en mí, por ser el empuje inicial para que yo emprendiera este proyecto en mi vida, por estar dispuestos siempre a ayudarme incondicionalmente tanto en mi vida, como en mi profesión; gracias a ti sami por infundir paz en mi corazón, fuiste algo magno para todos nosotros, gracias a ti mire eres como mi segunda madre, por ayudarme en todo mientras puedas, por siempre tener al menos una sugerencia o llamada de atención.,

gracias a ustedes Pepe y Raúl por ser los mejores hermanos por ser un ejemplo de personas selectas en esta vida, a ti Car porque con tus buenos consejos y excelentes investigaciones me han ayudado a elegir mi futuro, gracias Sandy por ser mi apoyo en todo, porque tienes la voluntad de cambiar muchas cosas a nuestro favor, por todos esos regaños bien merecidos, gracias a ti Joako porque eres como mi hermano mayor, por tu personalidad visionaria...gracias a todos ustedes mis hermanos por ser justamente quienes son, cada una de sus características nos hacen la mejor familia y los mejores hermanos que cualquiera quisiera tener.

A PERSONAS DISTINGUIDAS

A armando Botello, Salvador Rendón, Ana Karen Cárdenas, Armando Herrera, Mariano Martínez, Alejandro de la cruz, Maricruz Shoreque, Víctor Manuel Camacho, Maher Alemán, que fueron pieza clave para cultivar mi vida universitaria y que esta fuera una vida llena de alegrías, gozos, conocimientos. A todos mis buenos amigos “el negro, el yiyo, el goido, el pájaro, el nene, el baja, el vale, rica, Fausto, Obed, cristabel, allison, karito, edwin, anita, pedrito, jasmin, iris, Ismael, gera, marci, luis, que de algún modo u otro contribuyeron al bienestar físico moral y espiritual de mi persona y un reconocimiento especial a un gran compañero el Ing. Tariacuri Ramírez Hernández que fue uno de los promotores de mi carrera, y demás personas no menciono nombres por temor a omitir algún nombre importante para mí, a todos muchas gracias.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIA	V
ÍNDICE GENERAL	VII
INDICE DE CUADROS	VIII
RESUMEN	IX
INTRODUCCION	1
REVISIÓN DE LITERATURA	3
Origen e Historia del Tomate.....	3
Generalidades del Silicio.....	4
El Silicio en la Planta.....	6
Transporte de Silicio en la Planta.....	9
Importancia del Silicio en la Protección de Cultivos.....	12
El Silicio en la Nutrición de Cultivos.....	16
Protección del Si Contra la Toxicidad Vegetal por Elementos Minerales.....	18
MATERIALES Y MÉTODOS	19
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
CONCLUSIONES	30
BIBLIOGRAFÍA	31

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadrados medios de los análisis de varianza aplicado a variables estudiadas en tomate Saladett en Saltillo, Coahuila, 2010.....	23
Cuadro 2. Comparación de medias de características de tomate bajo tratamientos de nutrición con silicio, en Saltillo, Coahuila, 2010.....	24
Cuadro 3. Cuadrados medios de los análisis de varianza aplicado a minerales en fruto de tomate saladett en Saltillo, Coahuila, 2010.	25
Cuadro 4. Comparación de medias de análisis de minerales en frutos de tomate bajo tratamientos de nutrición con silicio, en Saltillo, Coahuila, 2010.....	29

RESUMEN

El objetivo del estudio fue verificar el efecto del silicio en el cultivo de tomate, mediante la aplicación al suelo y foliar y su repuesta en rendimiento y calidad de fruto. los tratamientos bajo estudio fueron; solución nutritiva mas 30 mg/L de Si foliar, solución nutritiva mas 60 mg/L de Si foliar, solución nutritiva mas 90 mg/L de Si foliar, solución nutritiva mas 30 mg/L de Si foliar y 100 mg/L al suelo, solución nutritiva mas 30 mg/L de Si foliar y 200 mg/L al suelo, solución nutritiva mas Si al suelo 100 mg/L, solución nutritiva mas 200 mg/L de Si al suelo, solución nutritiva mas 300 mg/L de Si al suelo, solución nutritiva mas 30 mg/L de Si foliar y 300 mg/L al suelo, comparados todos ellos contra un testigo absoluto.

Las plantas fueron desarrolladas en macetas de polietileno con suelo franco arcilloso como sustrato. Las aplicaciones de silicio ejercieron un efecto positivo en la calidad de los frutos elevando la firmeza, los sólidos solubles totales y la vitamina C. Además, se notó un efecto sinérgico en el contenido de minerales en el fruto, a saber P, Ca, Mg, K, Zn y Cu. Pero afectando de manera negativa el contenido de Fe y Mn

Palabras clave: *ácido silícico, minerales, calidad de fruto, silicio, Lycopersicon esculentum.*

INTRODUCCION

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia comercial en el mundo, tiene alta demanda y gran importancia en la dieta de la población, tanto por su consumo fresco, como en conservas; actualmente el tomate se consume en fresco, como ingrediente de ensaladas, en forma de jugo, deshidratado para sopas, en conservas al natural, pastas saladas, extracto tamizado y condimentado, frutos verdes en vinagre y mermeladas, sin embargo la creciente demanda hace necesario incrementar la cantidad y calidad de las cosechas y la nutrición de los cultivos es un factor fundamental para lograr altos rendimientos, aunque hay elementos como el silicio el cual se indica, no es esencial para los cultivos, aunque se ha encontrado que es un mineral beneficioso que juega un papel importante en la integridad estructural de las células vegetales, contribuyendo a las propiedades mecánicas, incluyendo rigidez y elasticidad, además la presencia de este elemento incrementa la resistencia al ataque de plagas y enfermedades, ésta resistencia se ha atribuido en parte a su acumulación y polimerización en las paredes celulares, lo cual constituye una barrera mecánica contra el ataque. Se ha demostrado que el tratamiento de las plantas con Si trae como consecuencia la acumulación de compuestos fenólicos, lignina y fitoalexinas. En plantas se ha observado que la fertilización con Si trae como consecuencia un aumento en la síntesis de peroxidasa, polifenoloxidasa, glucanasas y quitinasas; enzimas que están relacionadas con un incremento en la

producción de quinonas y especies reactivas de O_2 que tienen propiedades antibióticas, favorecen la mayor lignificación de los tejidos y un decremento en la preferencia de los insectos por las plantas.

El Si es un mineral beneficioso ya que controla el desarrollo del sistema radicular, la asimilación y distribución de nutrientes minerales, actúa proporcionando resistencia al estrés biótico (insectos, hongos, enfermedades) y abiótico (alta y baja temperatura, viento, alta concentración de sales y metales pesados, hidrocarburos, Aluminio, etc.), lo anterior es atribuido a la modificación de las propiedades de la pared celular.

A pesar de las grandes bondades que se le han atribuido al Si, existe poca información sobre el crecimiento de las plantas de tomate con la aplicación de Si como fertilizante, por lo tanto el objetivo del presente trabajo fue el estudio del silicio (utilizando como fuente el ácido silícico H_3SiO_4) en el cultivo de tomate, mediante la aplicación al suelo y foliar y su repuesta en rendimiento y calidad de fruto.

La hipótesis planteada es que la aplicación de silicio no afecta el rendimiento y la calidad de fruto en tomate.

REVISIÓN DE LITERATURA

Origen e Historia del Tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia comercial en el mundo; de alta demanda y gran importancia en la dieta de la población, tanto en consumo fresco, como en conservas (Nuez, 2008). La planta es nativa de América, cuyo origen se localiza cerca de los Andes en Latinoamérica en donde existe la mayor variabilidad genética y abundantes tipos silvestres.

La gran diversidad varietal encontrada en el centro del país, llevo a los botánicos a considerar a México como centro de origen del tomate cultivado en fruto grande. El termino tomate fue utilizado desde 1695 por los viajeros botánicos, quienes tomaron la palabra xitomate – xito-mate, con lo que los aztecas designaban a esta planta.

En el siglo XVIII el tomate mexicano fue conocido y consumido por todo el mundo aclimatándose a casi todos los países y en el siglo XIX llegar a ser un alimento básico en el consumo humano.

En la actualidad el tomate se consume en fresco, como ingrediente preferido de las ensaladas, en forma de jugo, deshidratado para sopas, en conservas al natural, pastas saladas, extracto tamizado y condimentado, frutos verdes en vinagre y mermeladas (Nuez, 1996).

Generalidades del Silicio

El silicio en el suelo procede de la degradación de las rocas ígneas; en ella se encuentra el sílice, (SiO_2), como constituyente de muchos silicatos y minerales arcillosos. Su contenido es variable, después del oxígeno, el silicio es elemento más abundante en la litosfera, expresado como SiO_2 , puede alcanzar en la capa arable rangos entre el 60 y 90%, (Navarro y Ginés, 2003).

El silicio (Si) es el segundo elemento más abundante en la litosfera (27.7%), solo detrás del O_2 (47,4%). Los compuestos de Si constituyen más del 60% de los compuestos del suelo y su concentración en forma soluble, como ácido silícico, está entre 35 y 40 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ o 0,1 a 0,6mM (Epstein, 1999; Ma *et al.*, 2004; Fauteux *et al.*, 2005).

A pesar de ser el segundo elemento más abundante en la litosfera, el Si se combina con el O_2 para formar silicatos insolubles en agua o redes de polímeros de dióxido de Si (cuarzo), y tiende a salir de la circulación en un ambiente aeróbico. El ciclo biogeoquímico de cualquier elemento asegura su recambio rápido, haciéndose asequible en diferentes formas o estados (sólido, líquido, gaseoso) y el ciclo del Si impide su abundancia en la biosfera. La fracción terrestre o de las aguas continentales del ciclo del Si alimentan la parte marina, pero la reposición solo puede proceder por vía del ciclo del sedimento marino. Esto último ocurre cuando hay elevación de montañas o subducción, lo cual puede retrasar decenas o centenares de millones de años el retorno del Si marino a los

continentes. El cuarzo, la forma más abundante de Si en la corteza terrestre, se intemperiza tan lentamente que no es una fuente apreciable de ácido silícico para la biota (Exley, 1998). La solubilidad del silicio, está influenciada por varios factores como: pH, temperatura, Potencial Redox, contenido de materia Orgánica, tamaño de partículas y principalmente su composición química (Cotton *et al.*, 1998).

En los últimos años el interés por estudiar el papel del silicio (Si) en los organismos vivos ha aumentado dada su abundancia en la corteza terrestre, el silicio (Si) es el segundo elemento más abundante en la litosfera (27.7%), solo detrás del oxígeno (47.4%). Los compuestos de silicio constituyen más del 60%, de los compuestos del suelo (Quero, 2007).

El dióxido de silicio (sílice), SiO_2 se asocia con otros elementos, por ejemplo con potasio y sodio, formando silicatos de potasio y sodio solubles en agua (Matinchenkov, 2004).

En los ecosistemas terrestres, el ciclo biogeoquímico del Si es más intenso que el ciclo del Fósforo y del Potasio. Las raíces aparentemente liberan enzimas (“*Silicazas y Silicateinas*”) y compuestos orgánicos (ácido cítrico y protones hidrógeno) que solubilizan el Si presente en las arcillas, que provienen de las rocas y minerales cuando son intemperizados por las condiciones del medio ambiente como lluvia, temperatura, viento, y las acciones mecánicas del manejo

de suelos. Por lo que las raíces con alta capacidad de extraer Si del suelo promoverán el mejor desarrollo de la planta (Pautot, 1991).

El silicio no es considerado como un elemento esencial para las plantas, lo que ha hecho que este elemento no sea incluido en las formulaciones de uso rutinario, además de no estar incluido en muchas investigaciones de fisiología vegetal. Sin embargo existen evidencias de que las plantas en las que existe carencia de silicio frecuentemente son más débiles y su crecimiento, desarrollo, viabilidad y reproducción es anormal, son más susceptibles al estrés abióticos, como toxicidad por metales, son fácilmente invadidas por microorganismos patógenos, insectos fitófagos y mamíferos herbívoros, todo esto se puede ver en plantas que crecen en suelos deficientes en silicio (Matichenkov, 2004).

El Silicio en la Planta

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 solida dentro de los tejidos de las plantas, especialmente en las células que forman el tejido tegumentario. El tejido tegumentario comprende el tejido epidérmico y suberoso (Aguirre et al., 2007). Las funciones fisiológicas del Si incluyen la reducción de la evapotranspiración, aumentando el suministro de oxígeno de la raíz mediante el fortalecimiento de las paredes de canales de aire (Jiménez, 2008).

El tejido epidérmico recubre todos los órganos de la planta (hojas, tallos, raíz y frutos), a excepción de meristemos apicales y el extremo de la raíz, es el encargado de regular la transpiración y el intercambio de gases, almacena agua, productos del metabolismo y protege de las acciones mecánicas exteriores, esto es gracias a la secreción de celulosa, calcio y silicio. El Silicio forma agregados insolubles (fitolitos) y solubles (polímeros del ácido ortosilícico), entrelazados con la celulosa y componentes de la pared celular, haciéndolas resistentes y flexibles, el tejido epidérmico está recubierto de la cutina o cutícula que es una capa externa impermeable, traslúcida y que la que protege a la planta de las acciones del agua, del aire y de microorganismos. (Quero., 2007)

El Si también parece estar relacionado con la respiración aeróbica y articulado con la glicólisis anaeróbica. Luego que la planta ha absorbido el Si como ácido mono silícico, el agua se pierde por transpiración y el Si permanece en los tejidos. Dentro de las plantas del 87 a 99% del Si en el tejido vegetal se localiza como una forma soluble en el haz de las hojas, vainas y cortezas (Jackobed and Ingred, 1993).

No obstante, los análisis realizados indican que la concentración de Si, y por lo tanto la presencia de fitolitos, es más influenciada por la posición filogenética (género, especie) que por factores ambientales tales como disponibilidad de agua y del mismo Si, o la temperatura (Hodson *et al.*, 2005). Nishimura *et al.* (1989) registraron en hojas de varias especies de plantas valores de 0,01% de Si, incluyendo entre ellas a *Sansevieria trifasciata* (Agavacea) y *Lycoris radiata*

(Amaryllidaceae) y los mayores valores (6,3%) en hojas de arroz, aunque otros reportes indican un contenido hasta del 10% (Nishimura *et al.*, 1989). Las poaceas, ciperáceas y commelináceas están entre las monocotiledóneas que acumulan más Si. Dentro de las dicotiledóneas, las urticáceas y cucurbitáceas son las que presentan niveles más altos de Si (Hodson *et al.*, 2005).

Los fitolitos son cristales de sílice que se forman en la epidermis de las plantas, esto es células vegetales que se han mineralizado y se presentan con una estructura cristalina similar a la del ópalo. Se forman por la precipitación del sílice disuelto en agua, y que las plantas absorben del suelo, que se deposita principalmente en los espacios intercelulares del tejido epidérmico de hojas, tallos y raíces. Al depositarse esta sustancia toma la forma de las células que recubre y encapsula. Estas partículas presentan formas distintivas y se conservan en el suelo, cuando la materia orgánica de la planta donde se formaron ha desaparecido.

En lo particular un fitolito también puede ser definido desde un punto de vista sedimentológico como una porción mineral de una planta, por lo común microscópica, que aparece formando parte de una roca sedimentaria (Teruggi, 1984).

Según el agente mineralizante se pueden distinguir los calcibiolitos (cuyo agente es una sustancia cálcica) y los silicobiolitos (formados por sílice amorfa). Ambos pueden ser de origen animal (calcizoolitos o silicozoolitos) o de origen

vegetal (calcifitolitos o silicobiolitos) respectivamente (Bertoldi de Pomar, 1975; Zucol, 1992).

Ehrenberg (1854) define al fitolito, como todo cuerpo mineralizado de origen vegetal, de tamaño microscópico y naturaleza química preferentemente silíceo o cálcico, integrante de tejidos orgánicos que son producidos por sustancias ergásticas (resultantes del metabolismo).

Transporte de Silicio en la Planta

Paasche (1973) y Azam, (1974) fueron los primeros en demostrar el transporte activo de sílice. En las diatomeas marinas, el transporte es dependiente del sodio y tiene características de tipo simporte sodio/ácido silícico. El mecanismo de simporte es el transporte simultáneo a través de la membrana celular de dos sustratos en la misma dirección, por un mismo transportador sencillo. Además, para este transporte se requiere energía metabólica, y puede ser inhibido por agentes bloqueantes sulfhidrilo (Felicja, 2010; Yool, 2003).

La relación entre el transporte de silicio con metales iónicos ha sido investigada pero no es bien comprendida. Una interacción entre zinc y cobre afecta la toma de ácido silícico, pero no está claro cómo afecta directamente al transporte (Rodríguez, 2005).

Otros estudios indican que el transporte del ácido ortosilícico al interior de la célula, se realiza en un proceso ligado a la membrana celular siguiendo la cinética de Michaelis – Menten, en el que el Si almacenado tiene una concentración entre 30 y 250 veces superior a la del medio. Esta absorción parece estar ligada a la división celular.

Paasche (1980), afirma que excepto a concentraciones muy bajas de ácido ortosilícico, la absorción está limitada más por la formación de las paredes de la valva que por la capacidad del transporte enzimático.

En las plantas, el Si es transportado de la raíz a los tallos, hojas y frutos por medio del torrente de agua de transpiración en el xilema. El H_4SiO_4 soluble puede penetrar las membranas celulares pasivamente. El transporte activo de H_4SiO_4 en plantas ha recibido poco estudio. Después de la adsorción por la raíz, el H_4SiO_4 es translocado rápidamente a las hojas de la planta en el torrente de agua de transpiración. Con el incremento de la concentración de H_4SiO_4 en la savia de la planta, este por condensación forma polímeros y con una gradual deshidratación forma el SiO_2 amorfo u ópalo biogénico, generalmente con algún grado de hidratación. En la siguiente reacción se ilustra el metabolismo de la biosilificación, $n(\text{Si}(\text{OH})_4) \gg \text{(SiO}_2) + 2n(\text{H}_2\text{O})$. Las formas poliméricas y amorfas del Si, se alojan en el tejido de la epidermis formando una capa fina de membrana siliciocelulosa (Si-C) que está asociado con pectina y iones calcio, además se forma otra capa sólida que corresponde a partículas con formas diversas pero definidas de SiO_2 , que se conocen como fitolitos, las cuales se

intercalan con la película de celulosa en la cutícula, otra parte de SiO_2 recubre las paredes externas de las células que componen a los tricomas (Quero, 2008).

La forma de Si que permanece dentro de las plantas es el gel sílica presente en la forma de sílica amorfo e hidratado o ácido silícico polimerizado. Otras formas de Si incluyen al ácido silícico y el ácido silícico coloidal. Se ha podido demostrar su presencia en el xilema bajo la forma de ácido monosilícico. Cabe recalcar que las plantas absorben Si únicamente en la forma de ácido monosilícico, también llamado ortosilícico (Datnoff, 2005; Kombrik *et al.*, 1995).

El ácido silícico es incorporado por transportadores específicos (Hildebrand y Wetherbee, 2003) y polimerizado intracelularmente en una vesícula especializada dentro de una matriz orgánica que consiste de poli péptidos catiónicos (Kröger *et al.*, 1999).

La concentración intracelular de ácido silícico se regula a través de su condensación y polimerización en un proceso dependiente del pH, lo que da como resultado sílice amorfa, que es depositado organizadamente para elaborar las frústulas. Después de la polimerización, el Si amorfo, hidratado en forma de $\text{Si}_n\text{O}_{2n-x}(\text{OH})_{2x}$, donde n y x son números enteros, es movilizado al exterior de la célula (Martin-Jézéquel *et al.*, 2000).

Importancia del Silicio en la Protección de Cultivos

Las funciones protectoras incluyen resistencia a patógenos, insectos, moluscos y pastoreo por herbívoros. Las brácteas de la inflorescencia silificada protegen el embrión. En general el silicio promueve un crecimiento normal y favorece el desarrollo y rendimientos. Esta función se refiere a la evolución de la interacción pasto–herbívoro. La complejidad vegetal es mayor en los pastos (Panicoideae), ya que han tenido la más larga historia de pastoreo de animales vertebrados (Heine, 2005).

El Silicio se acumula en la epidermis y se asocia con la pectina e iones de calcio, endureciendo el tejido y protegiendo así el ingreso de patógenos a la planta.

La densidad de estomas y tricomas en la planta está directamente ligada a las condiciones del medio ambiente y la disponibilidad de nutrientes, especialmente de silicio, calcio, potasio y magnesio. (Vladimir, 2006).

El grupo de células de la epidermis que participa activamente en la protección de los tejidos de la planta contra agentes abióticos y bióticos son los tricomas, sus características morfológicas y mecánicas (densidad, tamaño, textura superficial, forma, orientación) pueden influir la respuesta fisiología y ecológica de las plantas, estos son de gran importancia en la protección de la planta, su densidad y tamaño

está influenciado por la disponibilidad de silicio en el medio en el que se desarrolla (Vladimir, 2006).

Los tricomas glandulares, están constituidos por silicio entre 1 y 30%, y dependiendo de la densidad participan en el contenido total de silicio en la hoja con un 50 a 80% (Aguirre, et al., 2010), los tricomas glandulares a través de la liberación de compuestos fotoquímicas permiten la resistencia y tolerancia de las plantas al ataque de agentes bióticos, esto permite el control biológico de plagas y enfermedades, ya que la acción de las sustancias liberadas, actúan como repelentes, insecticidas, fungicidas, alelo-químicos, así como también participan en la percepción de estímulos, que mejoran la protección y adaptación de los vegetales. (Vladimir, 2006).

El rol de Silicio en las paredes celulares parece ser análogo a la lignina como un elemento de resistencia y mayor rigidez para la sustitución del agua entre las micro fibrillas y otros componentes de carbohidratos en las paredes de las células no lignificadas. Se considera que el efecto de silicio en la resistencia de la planta a las enfermedades es debido a la acumulación del silicio absorbido, en el tejido epidérmico o expresión de pathogenesis - inducido en la respuesta de defensa del hospedero (Aguirre *et al.*, 2010; Quero, 2007).

El Si controla el desarrollo del sistema radicular, la asimilación y distribución de nutrientes minerales, proporciona resistencia contra el estrés biótico (insectos, hongos, enfermedades) y abiótico (alta y baja temperatura, viento, alta

concentración de sales y metales pesados, hidrocarburos, Aluminio, etc.), esta es atribuida a la modificación de las propiedades de la pared celular (Legrand, 1990; Perry, 2000).

El silicio es un mineral benéfico e inclusive un nutriente esencial en algunas plantas. Juega un papel importante en la integridad estructural de las células vegetales, contribuyendo a las propiedades mecánicas, incluyendo rigidez y elasticidad (Seebold *et al.*, 2005). Además la presencia de este elemento incrementa la resistencia al ataque de patógenos e insectos, el papel del Si en la resistencia a plagas y enfermedades 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. En plantas tales como calabacita (*Cucurbita sp.*), avena (*Avena sativa*) y sorgo (*Sorghum bicolor*) se ha observado que la fertilización con Si trae como consecuencia un aumento en la síntesis de peroxidasa, polifenoloxidasa, glucanasas y quitinasas; estas enzimas están relacionadas con un incremento en la producción de quinonas y especies reactivas de O₂ que tienen propiedades antibióticas, favorecen la mayor lignificación de los tejidos, la disminución en la calidad nutricional y la digestibilidad, todo lo cual genera, consecuentemente, un decremento en la preferencia de los insectos por las plantas (Batista *et al.*, 2005). Este elemento está presente en las plantas, principalmente como gel de sílice, en las paredes celulares y como ácido mono silícico en la savia del Xilema (Mandamanchi, 1991). El rol de Si en las paredes

celulares parece ser análogo a la lignina como un elemento de resistencia y mayor rigidez para la sustitución del agua entre las microfibrillas y otros componentes de carbohidratos en las paredes de las células no lignificadas (Mandamanchi, 1991).

Los cultivos que extraen silicio con mayor intensidad son las gramíneas, que tienen además una alta eficiencia fotosintética. En la planta del arroz el silicio aumenta la resistencia al ataque de hongos y aumenta el rendimiento del cultivo. Así mismo, se ha observado que los silicatos disminuyen la toxicidad por hierro y manganeso en los cultivos. El silicio es un agente fortificador en células vegetales y las plantas que reciben silicio son menos susceptibles a problemas sanitarios. Silicio cumple una importante función en la integridad estructural, contribuye a las propiedades mecánicas de las células incluyendo rigidez y elasticidad (Aguirre *et al.*, 2007)

En los casos de aumento de resistencia al ataque de patógenos e insectos, es atribuido a la acumulación de silicio en las paredes celulares de la epidermis, lo cual se convierte en una barrera mecánica que no permite la fácil alimentación de las plagas, cuando el insecto devora las hojas de maíz en un suelo remineralizado, es decir, donde se aplicaron minerales ricos en silicio (MPASi), sus mandíbulas se deterioran, dificultando su alimentación ya que prácticamente comen “vidrio” (Quero, 2006; Matichenkov, 2004).

Por lo anterior la nutrición con silicio es vital y puede ser limitante para el manejo sustentable con calidad y sanidad de cultivos agrícolas y sus cosechas (Aguirre, *et al.*, 2010).

El Silicio en la Nutrición de Cultivos

Los fisiólogos vegetales no consideran al Si como un elemento esencial para las plantas; sin embargo, se ha reportado que la presencia de Si beneficia los cultivos, por inducción de resistencia y protección contra diversos factores ambientales bióticos y abióticos (Epstein, 1999).

El silicio (Si) que las raíces absorben en forma de ácido monosilícico (H_4SiO_4) de la solución del suelo es depositado como sílice amorfa hidratada ($SiO_2 \cdot nH_2O$) en espacios inter o intracelulares (Blackman, 1971; Piperno, 1988, 2006).

El ácido monosilícico (H_4SiO_4), es la forma en que el Silicio es absorbido por las plantas, este ácido Monosilícico reacciona con los Fosfatos insolubles de Al, Fe, Mn y Ca, formándose silicatos de cada uno de ellos liberando el ión Ortofosfato para ser absorbido por las plantas, el Silicio neutraliza mejor la toxicidad del Al en suelos ácidos, desafortunadamente la aplicación de cal fija el P y transforma el P-disponible en no disponible para la planta, siendo la aplicación del Silicio además de la anterior función, liberadora del P. El Silicio aumenta la

nutrición de P en las plantas de un 40 a 60% sin la aplicación de fuentes fosfatadas e incrementa la eficiencia de la aplicación de roca fosfórica de un 100 a 200%, previniendo la transformación del P en compuestos inmóviles (Quero, 2007).

El Silicio como mejorador del suelo puede reducir la lixiviación de los nutrientes en los suelos arenosos, especialmente N y K, guardándolos en una forma disponible para la planta (Quero, 2006). El silicio constituye entre el 0.1 y el 10 % del peso seco de las plantas superiores, en comparación con el calcio que está en valores que van desde el 0.1 al 0.6% y el azufre de 0.1 a 1.5%. (Matichenkov, 2004). La planta de arroz acumula hasta el 10% y en general las monocotiledóneas acumulan más silicio que las dicotiledóneas aunque pueden darse diferencias incluso a nivel de variedad (Epstein, 1999; Ma *et al.*, 2002).

Los beneficios logrados han fomentado la fertilización de los cultivos con silicatos, actualmente la aplicación de fertilizantes con Silicio es común en países asiáticos como Japón y Korea, gracias a los beneficios que han encontrado en aplicaciones de este elemento, también en Brasil, Australia, Sudáfrica e India hay información sobre los daños en mandíbulas de larvas de *Eldana saccharina* alimentadas con caña de azúcar con Si y sin Si (Olivia Kvedaras, 2005; Quero, 2007). Actualmente, la aplicación de fertilizantes con Si es común en Corea y Japón, con un consumo anual de 400.000 y 1.000.000 de toneladas, respectivamente, con lo que se logra un incremento y/o sostenimiento en la producción de arroz. La fertilización con Si también se ha documentado en Brasil,

Australia, Sudáfrica e India para incrementar la producción de caña de azúcar (Epstein, 1999).

Protección del Si Contra la Toxicidad Vegetal por Elementos Minerales

Se ha demostrado que el Si disminuye la toxicidad de distintos elementos. En plantas de cebada (*Hordeum vulgare*) cultivadas in vitro se evaluó el efecto de la adición de Si en la toxicidad del manganeso. Las plantas cuyo medio fue adicionado con 9,1µM de Mn presentaron manchas necróticas que fueron prevenidas por la adición de Si 357µM (10 ppm). Las hojas presentaron un contenido similar de Mn, pero al parecer el Si favoreció su distribución a través de toda la hoja y evitó la aparición de las manchas (Epstein, 1999).

El Al, con un 8.2% de abundancia en la litosfera, se encuentra en concentraciones elevadas en suelos ácidos, condición en la que resulta tóxica a las plantas. El algodón (*Gossypium hirsutum*) es muy sensible a 200µM de Al en solución, pero la toxicidad es mitigada por la presencia de Si (Epstein, 1999).

Experimentos con maíz (*Zea mayz*) han mostrado que la presencia de Si no afecta la concentración de Al monomérico en el medio externo; sin embargo, disminuye los efectos inhibitorios del Al sobre el alargamiento de la raíz. Esta respuesta es atribuida a la formación de aluminosilicatos de baja solubilidad en el apoplasto del ápice de la raíz, reduciendo la concentración de iones Al^{3+} en el medio (Epstein, 1999; Wang *et al.*, 2004).

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo fue realizado en Invernadero en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila, México. Se utilizó como material vegetativo; semillas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) del híbrido “Toro” de la empresa Harris Moran, con hábito de crecimiento determinado. Las semillas fueron sembradas el 28 de Mayo de 2010 en charolas de polietileno de 200 cavidades, utilizando como sustrato peat moss y perlita (75:25), las cuales fueron nutridas de manera tradicional, llevando a cabo dos fertilizaciones foliares de las plántulas, la primera 15 días de siembra, mientras que la segunda una semana después de la primera. Se utilizaron 180 plántulas las cuales fueron trasplantadas a los 31 días después de la siembra (DDS) en macetas de polietileno de color negro de 20 L en suelo franco arcilloso. Donde los tratamientos bajo estudio fueron los siguientes: solución nutritiva mas 30 ppm de Si foliar (T1); solución nutritiva mas 60 ppm de Si foliar (T2); solución nutritiva mas 90 ppm de Si foliar (T3); solución nutritiva mas 30 ppm de Si foliar y 100 ppm al suelo (T4); solución nutritiva mas 30 ppm de Si foliar y 200 ppm al suelo (T5); solución nutritiva mas Si al suelo 100 ppm (T6); solución nutritiva mas 200 ppm de Si al suelo (T7); solución nutritiva mas 300 ppm de Si al suelo (T8); solución nutritiva mas 30 ppm de Si foliar y 300 ppm al suelo (T9); y un testigo absoluto (T10). La solución nutritiva fue estimada en base a los criterios de Salisbury (1994) que consiste en proporcionar los minerales que la planta requiere para formar un determinado volumen de biomasa, tomando como base la materia seca.

Las macetas fueron establecidas en un invernadero de tipo túnel, con cubierta de polietileno de aprox. 4 metros de altura, teniendo ventilación pasiva mediante ventilas laterales. Se utilizó un acomodo en doble hilera para las macetas, teniendo una separación de cuarenta centímetros entre cada una de ellas. La solución nutritiva se fue adaptando según las etapas de desarrollo del cultivo en base al incremento de biomasa. Se mantuvo el valor del pH de la solución en 6.8, utilizando ácido sulfúrico.

A los diez días después del trasplante (DDT) se aplicó en promedio 0.5 litro de solución por maceta $\cdot \text{día}^{-1}$, en un solo riego diario, aumentando a 0.8 L día^{-1} los treinta días siguientes y de 1.2 a 1.8 L día^{-1} durante fructificación. El H₃SiO₄ grado reactivo, tuvo una consistencia líquida y se diluyó en una solución madre en frasco de 3 L, de la cual se fue tomando el volumen necesario para adecuar la concentración de los tratamientos, los cuales se empezaron a aplicar a los 20 DDT. Se realizaron 3 aplicaciones preventivas de imidacloprid contra plagas, la primera fue al momento del trasplante, las dos restantes con un mes de separación, contra las enfermedades se aplicó tiabendazol 60% junto con captan al trasplante y se hicieron 2 aplicaciones foliares más con una separación de un mes entre ellas, según las dosis recomendadas por el fabricante. El diseño experimental utilizado fue de bloques completamente al azar con seis repeticiones; de las cuales se tomaron al azar los frutos en madurez comercial, de tres plantas por cada tratamiento por repetición en el segundo corte, para determinar calidad de fruto se tomó en cuenta el diámetro polar (DP), diámetro

ecuatorial(DE) utilizando un vernier modelo “ Calipers Serie 530, la Firmeza (F) fue determinada mediante un penetrómetro para frutas “Modelo FT327 ” cuya lectura se registra en libras por pulgada cuadrada, y para los grados brix (*GB) se utilizo un refractómetro óptico modelo “RFB32ATC”, mientras que la determinación de vitamina C fue por el método de titulación con 2,6 dicloroindofenol- reactivo de Thielmann por triplicado cada muestra, para la variable frutos con pudrición apical se tomaron los frutos de tres plantas por repetición por tratamiento y se contó el numero de frutos sanos y el numero de frutos con daño.

Para el análisis de minerales se utilizaron muestras de hojas (la más recientemente madura) al inicio de fructificación, previamente secadas en la sombra. Para las variables de fruto se tomaron del segundo corte, las lecturas se realizaron con un espectrofotómetro de absorción atómica de la marca VARIAN, modelo AA-1275. Los elementos que se determinaron fueron Sodio (Na), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Manganeso (Mn), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Fósforo (P), los cuales posterior a la digestión se efectuaron las lecturas de manera directa, siendo necesario hacer diluciones para (Na, K, Ca, Mg y Zn) ya que originalmente dieron lecturas fuera de rango.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Cuadro 1, muestra que en las variables SST, FF, PA y VC, hubo diferencias estadísticas significativas entre tratamientos indicando que la respuesta de estas variables fue diferencial de acuerdo al tratamiento utilizado. Con el objetivo de identificar los tratamientos estadísticamente superiores se realizó una comparación de medias en todas las variables estudiadas.

Al analizar la variable SST (Cuadro 2) se encontró que el tratamiento 1, 7 y 9 fueron estadísticamente superiores al tratamiento 10, indicando que el tratamiento testigo presento un valor al observado con los tratamientos antes indicados, además los valores concuerdan con los reportados por Osuna (1983) que menciona que un valor mayor o igual a 4°Brix es considerado adecuado, indicando además que hay una correlación directa entre sólidos solubles y firmeza de fruto, lo cual no es coincidente con lo observado en el presente trabajo. Los SST son principalmente azúcares y ácidos orgánicos, estos últimos son benéficos antioxidantes para el cuerpo humano (Thakur *et al.*, 1996). En la variable FF también se encontró que el tratamiento 3 fue estadísticamente superior a los tratamientos 5, 8 y 10, el tratamiento solución nutritiva mas la aplicación de 90 ppm de silicio foliar, por lo tanto coincide con lo reportado por Batista *et al.* (2005), quienes mencionan que el silicio proporciona una mayor rigidez en las células de los tejidos, indicando que la aplicación foliar es mas efectiva que las aplicaciones al suelo, por su parte Mandamanchi (2005) indica que el rol de Si en las paredes celulares parece ser análogo a la lignina como un elemento de

resistencia y mayor rigidez para la sustitución del agua entre las micro fibrillas y otros componentes en las paredes de las células no lignificadas.

Cuadro 1. Cuadrados medios de los análisis de varianza aplicado a variables estudiadas en tomate Saladett en Saltillo, Coahuila, 2010.

Fuentes de Variación	Grados de libertad	Cuadrados Medios					
		SST	FF	DP	DE	PA	VC
Tratamientos	9	0.7645*	8.3323*	28.8854	11.2726	75.6722*	14.94*
Bloques	5	0.3749	0.59	26.8375	10.4687	47.2382	18.85
Error	45	0.1736	0.44	10.543	4.117	6.0291	5.00
CV(%)		9.82	11.93	3.89	3.89	47.0	13.2

SST= Sólidos Solubles Totales; FF= Firmeza de frutos; DP= Diámetro Polar; DE= Diámetro Ecuatorial; PA= Pudrición Apical VC= Vitamina C * = significativo al 0.05 de probabilidad; ** significativo al 0.01 de probabilidad; ns= No significativo.

En el caso de la variable frutos con “Pudrición apical” (Cuadro 2), se encontró que todos los tratamientos con silicio presentaron una menor cantidad de frutos dañados en relación con el testigo, encontrándose que el tratamiento 1 presento el menor daño. Rosemberg (2005) menciona que el silicio permite una interacción con el calcio, haciéndolo más móvil, Viana (2005) encontró que la aplicación de silicio tiene acción sinérgica con el calcio, llegando incluso hacer funciones estructurales similares al calcio y por lo tanto se sugiere que puede ser una de las razones por las que hubo menor incidencia de frutos dañados con “Pudrición Apical” en los tratados que en los no tratados con silicio. En DP y DE no se encontraron

diferencias significativas, por lo que se puede inferir que el silicio no tiene influencia sobre estas variables.

Cuadro 2. Comparación de medias de características de tomate bajo tratamientos de nutrición con silicio, en Saltillo, Coahuila, 2010.

Tratamiento	SST	FF	DP	DE	FPA	VC
	GB	Kg/Cm ²	mm	mm		mg/100g
1	4.500 A	5.550 ABC	84.977 A	53.110 A	1.167 E	16.6267 AB
2	4.250 AB	6.432 AB	87.290 A	54.557 A	5.167 BCD	15.1083 B
3	4.333 AB	6.802 A	81.247 A	50.780 A	3.000 DE	19.6733 A
4	3.917 AB	5.338 ABC	81.335 A	50.835 A	5.333 BCD	16.9650 AB
5	4.233 AB	5.137 BC	82.488 A	51.555 A	6.333 ABC	19.8083 A
6	4.267 AB	5.742 ABC	85.865 A	53.665 A	3.667 CDE	16.1033 AB
7	4.633 A	6.642 AB	83.200 A	52.000 A	6.667 AB	16.5917 AB
8	4.333 AB	4.403 CD	81.067 A	50.667 A	6.667 AB	16.9917 AB
9	4.550 A	6.590 AB	82.488 A	51.555 A	5.000 BCD	15.667 AB
10	3.40B	3.037 D	85.3A	53.3 A	8.16 ^a	15.99AB

GB= Grados Brix; FF= Firmeza de frutos; DP= Diámetro Polar; DE= Diámetro Ecuatorial; FPA= Frutos con pudrición apical; VC = Vitamina C; Medias con letras iguales no difieren significativamente para $p \leq 0.01$, según Tukey

El Cuadro 2, muestra que en todas las variables presentaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($P \leq 0.05$), lo cual indica que en estas variables respondieron de una forma diferente en los tratamientos aplicados. Con el objetivo de identificar los tratamientos estadísticamente

superiores se realizó una comparación de medias de todas las variables estudiadas.

Cuadro 3. Cuadrados medios de los análisis de varianza aplicado a minerales en fruto de tomate saladett en Saltillo, Coahuila, 2010.

Fuentes de Variación	Grados de libertad	Cuadrados Medios							
		Fe	Na	Cu	Ca	Zn	K	P	Mn
Tratamientos	9	21655.1	0.04	29.10	0.138	142240.9	1.17	0.0039	21.15
Bloques	5	1238.5	0.00	6.16	0.004	20166.4	0.05	0.0003	0.22
Error	45	493.7	0.00	5.60	0.004	10240.7	0.05	0.0003	0.55
CV(%)		18.27	9.26	17.27	24.31	11.1	16.26	8.6	6.61

NaF=Sodio en Frutos; CuF= Cobre en Frutos; Zn=Zinc en Frutos; MnF=Manganeso en Frutos!; FeH= Hierro en frutos; KF ;Potasio en Frutos; PF= Fosforo en Frutos; *= significativo al 0.05 de probabilidad.

Sodio

El Cuadro 4 muestra que el tratamiento 6, 8 y 9 presentaron los mayores valores de sodio y fueron estadísticamente diferentes del resto de los tratamientos, aunque es posible observar que los tratamientos 8 y 9 los cuales recibieron 200 y 300 ppm respectivamente de silicio, sin embargo el Si aplicado fue obtenido del silicato de sodio. esto tiene un principio lógico ya que la fuente de ácido silícico contenía sodio y el testigo (T10) no se le aplicó silicio mas sodio, por lo tanto éste tratamiento presentó una baja cantidad de sodio en fruto.

Cobre

Los tratamientos 4, 5 y 9 presentaron los mayores valores de Cu en fruto (Cuadro 4) y coincidentemente fueron de los que recibieron cantidades altas de silicio, por lo tanto se podría pensar que el silicio tiene un efecto sinérgico con el Cu. Lo anterior coincide con lo reportado por Berumen (2006), quien indica que el silicio actúa intercambiándose con estos elementos quedando en los coloides del suelo y de esa manera dejando otros nutrientes libres para la planta.

Zinc

Al analizar la concentración del elemento Zn en fruto se encontró una tendencia positiva en las aplicaciones al suelo, a mayor concentración de silicio en suelo, mayor cantidad de zinc (Cuadro 4), en cambio se observaron menores concentraciones de Zn en aplicaciones foliares con baja concentración de silicio. similares tendencias se observaron con el decremento de silicio, indicando que la aplicación de silicio tuvo una respuesta sinérgica con el zinc, estos resultados concuerdan con lo observado en otras investigaciones realizadas concentraciones mayores a 70 ppm de silicio en la rizosfera y por un mecanismo electrostático, permite liberar los nutrientes del suelo y por lo tanto hay una mayor absorción de estos por la planta (Horna, 2007).

Calcio

Para el calcio se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, aunque se encontró que los tratamientos con los menores niveles de Si fueron los que presentaron las menores concentraciones de Ca indicando tendencias probablemente de antagonismo entre el calcio y silicio, aunque definitivamente se encontraron cantidades mayores de calcio en los tratamientos con Si (Cuadro 4), indicando que probablemente sea recomendable estudiar dosis más bajas de Si, lo antes indicado coincide con los resultados Agromil, (2006) y Quero (2007) quienes afirman que Silicio tiene acción sinérgica con el Ca y Mg en niveles bajos, mejorando la vida de las cosechas, esto por la acción del calcio y funciones similares del silicio en frutos.

Fierro

De igual manera para el caso del Fe se encontraron diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 4) siendo el tratamiento 2 (60ppm) el que registró un mayor contenido de Fe en el fruto, secundado por las otras dos aplicaciones foliares que resultaron del mismo modo superiores y estadísticamente diferentes al testigo, resultando de igual manera menores las concentraciones de Fe en los tratamientos cuyas dosis son superiores a las 60 ppm esto coincide con lo encontrado por (Horna,2007), quien indica que las concentraciones mayores de silicio en tejido vegetal captan oxígeno que envían hacia la raíz llegando al aerenquima, oxidando de esta manera la rizófora (zona aledaña a la raíz), logrando que el Fe y el Mn reducido (forma en

que lo toma la planta) se oxide, siendo esta forma poco absorbida por las plantas, evitándose una toma excesiva de estos elementos, que aunque son necesarios para las plantas, su abundancia puede volverlos tóxicos.

Potasio

Al analizar potasio en fruto, se encontraron diferencias significativas resultando estadísticamente superiores al testigo el tratamiento 1 y 2 respectivamente logrando un 2.15% de Potasio, en comparación con el testigo que registro 1.67% Cuadro 4), lo cual coincide con estudios anteriores que indican que el silicio aumenta la cantidad de tricomas y por lo tanto permite el mayor flujo de algunos elementos como es el caso del potasio (Matichenkov,(2008).

Fosforo

En el caso del fosforo, el estudio evidencia diferencias significativas, principalmente en las aplicaciones foliares y al realizar la comparación de medias el tratamiento 2 (60pmm), resulto estadísticamente superior al resto de los tratamientos (Cuadro 4), registrando 0.25% de fosforo en fruto en comparación con el testigo que presento un 0.17% esto concuerda con los resultados encontrados por Caicedo, quien encontró correlación en la aplicación de silicio y fosforo en plántulas de cafeto mismo que sugiere que el silicio aumenta la absorción de fosforo en los tejidos y órganos de la planta (Caicedo,2007).

Cuadro 4. Comparación de medias de análisis de minerales en frutos de tomate bajo tratamientos de nutrición con silicio, en Saltillo, Coahuila, 2010.

	Na	Cu	Zn	Mn	Ca	Fe	K	P
Tratamiento	%	Ppm	Ppm	Ppm	%	Ppm	%	
1	0.155CD	12.00 AB	933.33ABC	13.66 A	0.45A	183.33 B	2.15 A	0.18BCD
2	0.208 B	12.66B	800.00C	11.00BC	0.36AB	249.83 A	2.15 A	0.25 A
3	0.152 CD	14.33AB	550.00D	12.00B	0.26BC	137.33 C	0.79 E	0.15 D
4	0.192 BC	15.66A	1050.0A	11.83B	0.32B	68.00 D	1.26 CD	0.20 B
5	0.207 B	16.16A	1016.6AB	10.00C	0.23BCD	54.67 C	1.76 AB	0.17CD
6	0.252 A	9.50B	850.00BC	8.33D	0.18CD	52.83 D	1.51 BC	0.18BC
7	0.218 B	11.50AB	1066.66A	1033C	0.21BCD	80.03 D	1.32 CD	0.19BC
8	0.34 A	14.66AB	1016.66AB	10.16C	0.21BCD	89.88 D	0.77 E	0.19 BC
9	0.35 A	16.00 A	933.33ABC	14.66A	0.22BCD	84.67 C	0.97 DE	0.18BCD
10	0.117 D	14.50 B	900.00ABC	10.16C	0.13D	185.50 D	1.65 BC	0.17BCD

NaF=Sodio en Fruto; CuF= Cobre en frutos; ZnF= Zinc en fruto; MnF=Manganeso en frutos; FeF= Fierro en Frutos ; KF ;Potasio en frutos; PF=Fosforo en frutos; Medias con letras iguales no difieren significativamente para $p \leq 0.01$, según Tukey

CONCLUSIONES

Las aplicaciones exógena de silicio en forma de ácido silícico en plantas de tomate favorecen la acumulación de sólidos solubles y aumentan la firmeza de frutos. La aplicación de silicio favorece la absorción de calcio, fósforo, zinc y cobre por el fruto, pero afecta de manera negativa el contenido de Fe y Mn.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre Mancilla C.L. y Raya Pérez J.C.2010. EL SILICIO EN LAS PLANTAS. Centro de Investigación Aplicada del Instituto Tecnológico Superior de Uruapan (CIA-ITESU). Carretera Uruapan-Carapan No. 5555, Colonia La Basilia, Uruapan, Michoacán, C.P. 60015, México. Tel: 01(452)5275050, Fax: 01(452)5270109, e-mail: cmancilla@tecuruapan.com.mx
- Aguirre, C. EL SILICIO EN LOS ORGANISMOS VIVOS. Interciencia, agosto, año/vol. 32, numero 008, Asociación Interciencia Caracas Venezuela pp. 504 – 509.
- Batista GF, Campos MJ, Dionizete SC, Marcos GM 2005 Resistance induction in wheat plants by-silicon an aphids Sci. Agric. 62: 547-551
- Berumen, J. G. 2006. Aplicación de Silifertidol. E mail: silifertidol@itsrll.edu.mx
- Bradbury, J. (2004). Nanotechnologists de la naturaleza: Revelación de los secretos de diatomeas. Biología de PLoS 2, 1512-1515.
- Caicedo,L.M and 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, 2007.
- Datnoff, L. and Rodriguez, Á. 2005. The Role of Silicon Suppressing RiceDiseases. APSnet Feature, The American Phytopathological Society. En: <http://www.apsnet.org> (Visitado en Septiembre 2010).

- Datnoff, L. and Rodriguez, Á. 2006. Applied Silicon on the Enhancement of Induced Resistance to Powdery Mildew in *Cucumis sativus*. *Plant Pathology*. 54: 678 – 685.
- Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 91: 11-17. Liang, Y., Sun, W. and Romheld, V. 2005. Effects of Foliar and Root.
- Espinoza, L. 2007. Monitoreo in vitro del potencial de cinco nutrientes (B,Zn,Mn,Cu,Si) sobre el desarrollo de diferentes estructuras de *M. fijiensis*. ESPOL – Tesis de Grado. Ecuador.
- García, E. and Apezteguia, H. 2001 Estudio del Lixiviado de compost y su efecto sobre el control de Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) y el crecimiento del cultivo de banano (*Musa AAA*). 41p.
- Geoffroy, P., Legrand, M. and Fritig, B. 1990. Isolation and characterization of a proteinaceous inhibitor of microbial proteinases induced during the hypersensitive reaction of tobacco mosaic virus. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 3:327-333.
- Gunes A, Inal A, Bagci EG, Pilbeam DJ (2007) Silicon-mediated changes of omephysiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach and tomato grown in sodic-toxicsoil. *Plant Soil* 290: 103-114.
- Hammerschmidt, R. 1993. The nature and generation of systemic signals induced by pathogens, arthropod herbivores and wounds. *Advances in plant Pathology* 10:307-337.
- Harper, H. E. y Knoll, A. H. (2005). Silicona, diatomeas, y evolución radiolarian cenozoica. *Geología* 3, 175-177.

- Hasing, L. M. 2007. Impacto de las Aplicaciones de un Mineral Bio-Activo sobre Parámetros Agronómicos y Fitosanitarios en Plantas de Banano del grupo Cavendish, Variedad Williams a nivel de Laboratorio e Invernadero. ESPOL – Tesis de Grado, Ecuador.
- Heine, G. 2005. Silicon Nutrition and Resistance against *Pythium aphanidermathum* of *Lycopersicon esculentum* and *Momordica charantia*. Universität Hannover. Hannover, Germany. 1-15.
- Hildebrand M, Wetherbee R (2003) Components and control of silicification in diatoms. En Müller WEG (Ed.) *Silicon Biomineralization*. Progress in Molecular and Subcellular Biology. Vol. 33. Springer. Heidelberg, Alemania. pp. 11-57.
- Hodson MJ, White PJ, Mead A, Broadley MR (2005) Phylogenetic variation in the silicon composition in plants. *Ann. Bot.* 96: 1027-1046.
- Hodson, M. Rosenberg. 2005. Aluminium/silicon interactions in higher plants. *J. Exp. Bot.* 46:161-171.
- Horna, R. Z. 2007. Efectos del silicio en la nutrición vegetal producción de silicio orgánico. E mail: agripitus@hotmail.com
http://www.santafelicia.edu.pe/materialtrabajo/1eroSec_Botanica.pdf.
- J. F. Ma and N. Yamaji, 2008. Functions and transport of silicon in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*. Volume 65, Number 19, 3049-3057, DOI: 10.1007/s00018-008-7580-x Review
- Jakobek, J. L. and Lindgren, P. B. 1993. Generalized induction of defense responses in bean is not correlated with the induction of the hypersensitive response. *The Plant Cell* 5:49-56.

- Jézéquel M. V, Hildebrand M, Brzezinski MA (2000) Silicon metabolism in diatoms: implications for growth. *J. Phycol.* 36: 821-840. Cole and H. C. Hoch, (eds.), The fungal spore and disease initiation in plants and animals. pp. 347-362. Plenum, New York.
- Jiménez, M. 2008. Effect of the nutritional status of banana (*Musa spp.*) on leaf disease infestation by *Mycosphaerella fijiensis* Morelet in Ecuador. PhD Thesis. Catholic University Leuven - Belgium. 146p.
- Kombrink, E. and Somssich, I. E. 1995. Defense response of plants to pathogens. *Advances in botanical research incorporating advance in plant pathology*. Vol. 21.
- Kröger N, Deutzmann R, Sumper M (1999) Polycationic peptides from diatom biosilica that direct silica nanosphere formation. *Science* 286: 1129-1132.
- Mandamanchi, N. R. and Kuc, J. 1991. Induced systemic resistance in plants. In: G. Mandamanchi . B. M. 2005. Effect of calcium silicate on blast and brown spot intensities and yields of rice. *Plant Disease*. 75(7):729-732. Mulder, E. G. and Brotonegoro, S. 2004. Free—living heterotrophic nitrogen-fixing bacteria. pp. 37-85. In: A. Quisquel (eds.), *The biology of nitrogen fixation*. North Holland Publishing Company, Amsterdam 769 p.
- Merrimann, P. R., Price, R. D., Baker, K. F., Kollmorgen, J. F., Piggott, T. and Ridge, E. H. 1975. Effect of *Bacillus* and *Streptomyces* sp. applied to seed. pp 130-133. In: G. W. Bruehl (eds.), *Biology and control of soilborne plants pathogens*. American Phytopathological Society, St Paul, Minnesota. 216p.
- Navarro, B, Navarro G y Ginés. 2003. *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal* (2a. ed.). Editorial Mundi-

Prensa.Pp492. Consultado el 25 de Febrero del 2009. Disponible en:
<http://site.ebrary.com/lib/espesp/docDetail.action?docID=10246547&p00=quimica%20agricola%20evolucion%20y%20concepto>.

Navarro, S. & Navarro, G. (2000). Química Agrícola. Barcelona: Mundiprensa. pp. 424-427.

Nishimura K, Miyaki Y, Takahashi E (1989) Silicon, aluminium, and zinc accumulators discriminated from 147 species of Angiospermae. *Mem. Coll. Agric. Kyoto Univ.* 133: 23-43.

Osuna, G. J. A. 1983. Resultados de la investigación sobre tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill), bajo el sistema de acolchado de en condiciones de invernadero. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Pautot, V., Holzer, F. M. and Walling, L. L. 1991. Differential expression of tomato proteinase inhibitor I and II genes during bacterial pathogen invasion and wounding. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 4:284-292.

Perry, C.C. and Keeling-Tucker, T. (2000). Biosilicification: the role of the organic matrix in structure control. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 5: 537-550.

Perry, C.C. and Keeling-Tucker, T. (2000). Biosilicification: the role of the organic matrix in structure control. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 5: 537-550

Piperno DR, Holst I, Weassel-Beaver L, Andrés TC (2002) Evidence for the control of phytolith formation in *Cucurbita* fruits by the hard rind (Hr) genetic locus: archeological and ecological implications. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 99: 10923-10928.

- Prohens, J. and Nuez, F. Handbook of plant breeding, vol. 2, Vegetables II: Fabaceae, Liliaceae, Solanaceae, and Umbelliferae, 2008, 365p.
- Quero, G.E. (2007). Silicio en la protección de las plantas. Wednesday, 10 de January de 2007, división de investigación, instituto tecnológico superior de Uruapan, carr. Uruapan a carapan # 5555, col. La basilia, Uruapan, michoacán, cp 60015, tel. 014525275050, cell. 0135151 02171.
- Quero, G. E.(2007). Remineralización de suelos con materiales ricos en silicio mpasi. (maiz). Publicado en: revista de riego numero de febrero-marzo del 2007 pp.18- 22.
- Redondo, F. E. y Crawford, R. M. (1990). *Las diatomeas. Biología y morfología de los géneros*, Prensa de la universidad de Cambridge, Reino Unido.
- Roby, D., Toppan, A. and Esquerre-Tugagaye, M. T. 1987. Cell surfaces in plant microorganism interactions. VII. Increased proteinase inhibitor activity in melon plants in response to infection by *Colletotrichum*
- Seebold, W.; Datnoff, E.; Correa, J.; Kucharek, A. and Zinder, H. 2005. Effect of silicon and host resistance on Shealth Blight development rice. Salisbury, F.B. and C.W. Ross. 1994. Plant Physiology. Wadsworth Publishing, Inc. USA.
- Seebold, W.; Datnoff, E.; Correa, J.; Kucharek, A. and Zinder, H. 2005. Effect of silicon and host resistance on Shealth Blight development rice.
- Taylor, J. L., Fritzemeier, K. H., Hauser, I., Kombrink, E., Rohwer, F., Schroder, M., Strittmatter, G. and Hahlbrock, K. 1990. Structural analysis and activation by fungal infection of a gene encoding a pathogenesisrelated protein in potato. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 3:72-77.

- Thakur, N.K., G.H. Korndorfer, L.E. Datnoff, and G.H. Snyder. 1996. Silicon Nutrition and Sugarcane Production: A Review. *Journal of Plant Nutrition* 22(12):1853 - 1903.
- Viana, Julio E., P. 2005 La función del silicio en la nutrición vegetal – Tesis de grado. Chile.
- Vladimir V. Matichenkov, (2008) Silicon. Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia.
- Vladimir V. Matichenkov, Silicon. Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia, 2004.
- Yool, A. y Tyrrell, T. (2003). Papel de diatomeas en la regulación del ciclo del silicio del océano. *Ciclos biogeoquímicos globales* **17**, 1103, doi: 10.1029/2002GB002018.