



## III CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMIIR 2017

Puebla, Pue., del 28 al 30 de noviembre de 2017

### RESPUESTA EN CHILE MANZANO A LA ABSORCIÓN DE SILICIO EN UN SISTEMA HIDROPÓNICO

**Jorge Alfredo Ortiz Quintero<sup>1\*</sup>; Daniel López Osorio<sup>2</sup>; Claudio Pérez Mercado<sup>3</sup>; César Sánchez Hernández<sup>4</sup>; Miguel Ángel Sánchez Hernández<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable, Instituto Tecnológico Superior de Ciudad Serdán, Av. Tecnológico s/n, Col. La Gloria, Ciudad Serdán, Puebla, C.P. 75520. México.

[ortiz@correo.chapingo.mx](mailto:ortiz@correo.chapingo.mx) – telf.: 557 418 9107 (\*Autor de correspondencia)

<sup>2</sup>Colegio de Posgraduados, Carretera México Texcoco Km36.5, Montecillo, Texcoco, C.P. 56230. México

<sup>3</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México Texcoco Km 38.5, Chapingo, Texcoco, C.P. 56230. México.

<sup>4</sup>Universidad de la Cañada, Carretera Teotitlán San Antonio Nanahuatipan Km 1.7, Teotitlán de Flores Magón, C.P. 68540. México.

<sup>5</sup> Universidad del Papaloapan, Av. Ferrocarril s/n, Loma Bonita, Oaxaca, C.P. 68400. México.

#### Resumen

Investigaciones en pepino realizadas en solución nutritiva sugieren que el silicio puede ser un elemento benéfico para el crecimiento de las plantas de algunas hortalizas. Con base en lo anterior se realizó un experimento para estudiar los efectos del Si y la solución nutritiva, así como su interacción sobre diámetro de tallo, peso fresco y seco, composición y distribución de Si, potasio y calcio en parte aérea y raíz en plantas de chile manzano cultivado en un sistema cerrado de subirrigación. Los tratamientos consistieron en ocho soluciones nutritivas resultantes de la combinación de dos factores: concentración de  $\text{SiO}_3^{2-}$  (0, 0.5, 0.75 y 1 mol.m<sup>-3</sup>) y soluciones nutritivas (Steiner y Espinosa) en un diseño factorial completamente al azar. No se presentó interacción significativa sobre la variable diámetro de tallo, sin embargo, el aportar 0.5 mol.m<sup>-3</sup> causó un efecto benéfico sobre peso fresco, peso seco de parte aérea y peso seco total, el peso fresco y seco de raíz no fue afectado por la adición de silicio ni por el tipo de solución nutritiva empleada. La concentración de Si en parte aérea se incrementó al incrementar la adición de silicio (1mol.m<sup>-3</sup> de  $\text{SiO}_3^{2-}$ ), el mejor tratamiento en el cual se obtuvo la más alta concentración de Si en parte aérea fue 1 mol.m<sup>-3</sup> en solución Espinosa (919.3 ppm), mientras que para la raíz la combinación adecuada fue 0.5 mol.m<sup>-3</sup> en solución Steiner (1432 ppm). No hubo interacción de los factores sobre la concentración de calcio y potasio en parte aérea.

**Palabras clave adicionales:** *Capsicum Pubescens*, silicio, cultivo en solución, análisis nutrimental, metasilicato de sodio.



## Introducción

El silicio ha favorecido el crecimiento y desarrollo de cultivos en suelo y en condiciones de estrés abiótico o biótico (Epstein, 1999). En el cultivo de pepino provocó un efecto benéfico sobre el crecimiento de las plantas al adicionar  $0.75 \text{ mol SiO}_3^{2-} \text{ m}^{-3}$  a la solución universal de Steiner modificada para la inclusión de  $\text{SiO}_3^{2-}$  (Parra *et al.*, 2004). Por su parte Miyaki y Takahashi (1982) reportaron que las aplicaciones de silicio en la solución nutritiva ( $0.08$ ,  $0.33$  y  $1.67 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ) provocaron aumentos significativos en el número y peso de frutos, número de hojas, altura y peso seco de plantas de pepino.

Algunas funciones han sido atribuidas al silicio: mejora el balance de nutrientes, reducción de toxicidades por minerales. Algunos de los beneficios del silicio en los cereales han sido expuestos en algunas investigaciones; se le ha atribuido el favorecer el crecimiento y rendimiento en arroz, disminución de enfermedades fungosas en trigo (Savant *et al.*, 1997; Datnoff y Rodrigues, 2005).

Las plantas absorben el  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  en diferentes cantidades, de acuerdo a su tipo de absorción (activa, pasiva y repulsiva) (Takahashi y Miyake, 1982) y a su especie. Jones y Handreck (1965) analizaron el contenido de silicio de plantas de diversas especies desarrolladas en suelo y con base en ello las clasificaron en tres grupos: gramíneas con alta acumulación de silicio en hojas (5-15%); gramíneas de acumulación intermedia (1-3%); y la mayoría de las dicotiledóneas, de acumulación baja (<1.0%). Por su parte, Takahashi y Miyake (1977), citado por Parra (2008) determinaron los contenidos de silicio en hojas de 175 especies y las clasificaron en dos grupos: plantas acumuladoras (mayor a 1% Si) y no acumuladoras (menor a 1% Si). En las plantas, el transporte a largas distancias de Si es realizado en el xilema y en este transporte, altas cantidades de Si son depositadas en las paredes celulares de los vasos del xilema, lo cual es importante ya que evita la compresión de los vasos, cuando la transpiración es alta (Balasta *et al.*, 1989). Parra (2008) menciona que los procesos de absorción de agua y de los iones de  $\text{SiO}_3^{2-}$  disueltos en ella, así como su ascenso a través de la planta hasta alcanzar el fruto, en pepino, se dieron mediante flujo de masas.

En la nutrición de chile manzano mediante hidroponía se ha reportado el uso de la solución universal de Steiner en diferentes concentraciones (Pérez y Castro, 2008), mediante este trabajo se comparará esta solución nutritiva con la solución Espinosa que difiere en concentración nutrimental adicionadas con  $0$ ,  $0.5$ ,  $0.75$ , y  $1 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$  de  $\text{SiO}_3^{2-}$  con el objetivo de evaluar el efecto en peso fresco, peso seco, diámetro de tallo, acumulación de silicio, potasio y calcio en plantas de chile manzano cultivado en un sistema hidropónico de subirrigación.

## Materiales y métodos

Este trabajo de investigación se llevó a cabo en los laboratorios de Agricultura Protegida y de Nutrición de Frutales del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México. Para la realización del experimento se estableció el sistema hidropónico, empleando 40 botellas de pet transparentes de 1.5 litros de capacidad. En este sistema de subirrigación hidropónico se emplean dos



tipos de contenedores: a) el contenedor superior, que se rellena con sustrato y consiste del cono resultante de disectar con un corte transversal una botella de pet de 1.5 litros de capacidad, b) el contenedor inferior, que contiene la solución nutritiva y que complementa con el contenedor superior para formar la botella de pet. A las “taparrosas” de plástico se le hicieron de 5 a 6 perforaciones de 0.5 cm de diámetro, con un taladro. Los contenedores fueron establecidos en un diseño completamente al azar en 4 hileras de 10 cm de separación entre ellas y 10 cm entre filas. Las soluciones nutritivas se obtuvieron a partir de fórmulas madre en contenedores de 20 litros, para preparar la solución Steiner (cuadro 1) y para preparar la solución Espinosa (cuadro 2), éstas fueron aplicadas manualmente con un recipiente de 500 mL. Cada planta fue trasplantada en el contenedor superior o cono con tezontle.

**Cuadro 1.** Cantidad de fertilizantes utilizados para preparar 1000 L de solución nutritiva Steiner, modificada por Pérez y Castro (Perez y Castro, 2008)

Fuente	Concentración de la solución 100% (g)
Ácido fosfórico 85%	100 (mL)
Sulfato de potasio	870
Sulfato de magnesio	1230
Nitrato de potasio	750
Nitrato de calcio	1300
Sulfato ferroso	50
Sulfato de manganeso	10
Sulfato de zinc	5
Sulfato de cobre	5
Bórax	20

**Cuadro 2.** Cantidades de nutrimentos empleadas en las soluciones madre para preparar la solución nutritiva Espinosa

Nutrimento	Fuente de Fertilizante	Concentración del elemento (ppm)	Volumen mL L <sup>-1</sup>
			S. Espinosa
Ca	Nitrato de calcio	40000	5.75
N	Nitrato de amonio	28000	1.393
P	Ácido fosfórico	62000	1.2
K	Sulfato de potasio	39000	5.64
Mg	Sulfato de Magnesio	48000	1.25
Fe	Sulfato ferroso	7000	0.429
Mn	Sulfato de manganeso	55000	0.012
Cu	Sulfato de cobre	635	0.157
B	Ácido bórico	5500	0.127
Zn	Sulfato de zinc	13995.6	0.007

Se simularon 8 condiciones nutrimentales y siendo 4 de ellas correspondientes a la solución Steiner y las 4 restantes a la solución Espinosa, en ambas soluciones se emplearon las concentraciones de 0, 0.5, 0.75 y 1 mol m<sup>-3</sup> de Silicio. (Cuadro 3). Los aportes de silicio, se realizaron 15 días después del trasplante; se realizaron a base de metasilicato de sodio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O), por separado a la solución nutritiva y de manera localizada de acuerdo a cada tratamiento (Cuadro 3). A la sal silícica se le neutralizó el



efecto alcalino, mediante una mezcla triácido 1N, correspondiente a ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), valorada con carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), preparada en la proporción de 60:5:35. La solución de metasilicato de sodio fue valorada con ftalato ácido de potasio.

**Cuadro 3.** Concentraciones empleadas en cada solución nutritiva para los ocho tratamientos

Tratamiento	$\text{SiO}_3^{2-}$ $\text{molm}^{-3}$	Solución nutritiva
1	0	Steiner
2	0.75	Steiner
3	0	Espinosa
4	0.75	Espinosa
5	0.5	Steiner
6	1	Steiner
7	0.5	Espinosa
8	1	Espinosa

Los nutrimentos (Si, K y Ca) se cuantificaron por el método de digestión húmeda (Alcántar y Sandoval, 1999) y su cuantificación se realizó en un espectrofotómetro de absorción atómica. El análisis de varianza de las variables se realizó evaluando los factores principales del diseño factorial y la interacción de ambos. La comparación de medias de las interacciones significativas se hizo mediante la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). Estos análisis estadísticos se realizaron con el programa SAS (Statistical Analysis System, 1999).

## Análisis y discusión de resultados

### Diámetro de tallo

El análisis de varianza indica, que aunque los factores A (concentración de silicio) y  $\beta$  (solución nutritiva) en el experimento se pusieron juntos, sus efectos en el diámetro de tallo son independientes (no hay correlación entre ellos), por lo cual se puede interpretar por separado los efectos principales de A y de  $\beta$ . Parra (2004), menciona que las concentraciones de 0.75 y 1.5  $\text{molm}^{-3}$  de  $\text{SiO}_3^{2-}$  incrementaron el diámetro de tallo con respecto al testigo en plantas de pepino, sin embargo, en la presente investigación no hubo efectos significativos de ambos factores ya que en la fuentes de variación A y  $\beta$  con  $\alpha=0.05$  indica que las concentraciones de silicio no difieren, tampoco las soluciones nutritivas.

### Peso fresco de la parte aérea

El análisis de varianza indica que no hay interacción entre los factores solución nutritiva y aplicación de silicio, con  $\alpha=0.05$ . Al analizar de manera independiente el efecto del silicio se encontró que los niveles de silicio difieren y de acuerdo a la prueba de Tukey, las concentraciones de silicio que causaron mayor peso fresco de la parte aérea (estadísticamente iguales) fueron 0.5  $\text{molm}^{-3}$  (91.39 g) y 1  $\text{molm}^{-3}$  (69.4 g). La hipótesis nula para el factor  $\beta$  no se rechazó con  $\alpha = 0.05$ , indicando que las soluciones nutritivas no difieren.



**Cuadro 4.** Comparación de medias para tratamientos y efectos principales de la concentración de  $\text{SiO}_3^{2-}$  y la solución nutritiva sobre el peso seco total, peso fresco y seco de la parte aérea y de raíz a los 167 días después de la siembra.

Factor	Peso fresco parte aérea	Peso fresco raíz	Peso seco parte aérea	Peso seco raíz	Peso seco total
------(g)-----					
$\text{SiO}_3^{2-}$ ( $\text{mol m}^{-3}$ )					
0.75	53.518 b	13.318 a	11.906 b	2.1590 a	14.065 b
0.5	91.393 a	17.633 a	19.662 a	3.2180 a	22.880 a
1	69.464 ab	12.055 a	15.054 ab	2.5470 a	17.601 ab
0	45.630 b	10.693 a	9.165 b	2.7080 a	11.873 b
$T_\alpha$	27.005	7.2761	6.237	1.3691	7.2721
Solución					
Espinosa	67.460 a	15.02 a	13.879 a	2.6845 a	16.564 a
Steiner	62.543 a	11.83 a	14.015 a	2.6315 a	16.646 a
$T_\alpha$	14.356	3.8681	3.3157	0.6747	3.866
Solución x $\text{SiO}_3^{2-}$ ( $\text{mol m}^{-3}$ )					
Espinosa x 0.75	55.30 b	12.484 a	11.430 b	1.8400 a	13.270 ab
Espinosa x 0.5	105.46 a	16.302 a	22.084 a	3.4300 a	25.514 a
Espinosa x 1	57.05 b	8.710 a	12.084 ab	2.4880 a	14.572 ab
Espinosa x 0	52.02 b	9.822 a	9.918 b	2.9800 a	12.898 b
Steiner x 0.75	51.73 b	14.152 a	12.328 ab	2.4780 a	14.860 ab
Steiner x 0.5	77.32 ab	18.964 a	17.240 ab	3.0060 a	20.246 ab
Steiner x 1	81.88 ab	15.400 a	18.024 ab	2.6060 a	20.630 ab
Steiner x 0	39.24 b	11.564 a	8.412 b	2.4360 a	10.848 b
$T_\alpha$	45.66	12.303	10.546	2.1458	12.295

Medias con la misma letra no presentan diferencias, de acuerdo a la prueba de Tukey, con  $\alpha=0.05$ .  $T_\alpha$ : diferencia mínima significativa de Tukey.

### Peso fresco y seco de raíz

En el análisis de varianza, se encontró que no hay interacción entre los factores A y  $\beta$ , por otra parte, las concentraciones de silicio producen el mismo efecto, al igual que ambas soluciones nutritivas (Cuadro 4). Por su parte Adatia y Besford (1986) reportaron que las aplicaciones de silicio (0 y  $1.67 \text{ mol m}^{-3}$ ) a la solución nutritiva, incrementaron en forma significativa el peso fresco y seco de la raíz de plantas de pepino, sin diferencias estadísticas en el rendimiento de frutos; algo similar en lo reportado por Parra (2004), ya que la aplicación de  $0.75$  y  $1.5 \text{ mol SiO}_3^{2-} \text{ m}^{-3}$  también incrementó, aunque no significativamente, el valor de estas variables.

### Peso seco de parte aérea

El análisis de varianza indica que no hay interacción entre los factores solución nutritiva y aplicación de silicio, con  $\alpha=0.05$ , por lo que en la comparación de medias se encontró que la adición de  $0.5$  y  $1 \text{ mol m}^{-3}$  causaron mayor acumulación de materia seca (Cuadro 4), mientras que el menor valor se obtuvo donde no se aplicó silicio.

### Peso seco total

No se encontró interacción de los factores A y  $\beta$ , tampoco en la fuente de variación  $\beta$ , pero en la fuente de variación A, lo que indica, que una concentración de silicio difiere



estadísticamente de otra concentración para peso seco total de plantas de Chile. El mayor peso seco total se obtuvo con los niveles de  $0.5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  (22.880 g) y  $1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  (17.6 g), estadísticamente iguales (Cuadro 4).

### Concentración de silicio en parte aérea

En la fuente de variación  $A*\beta$  del análisis de varianza (Cuadro 5) hay una interacción significativa de las soluciones nutritivas con las concentraciones de silicio, pero esta interacción no es muy “fuerte” ya que con  $\alpha=0.01$  no hay una interacción significativa, esto se refleja en la prueba de Tukey ya que la respuesta a las soluciones fue similar en cada nivel de silicio (Cuadro 7). Una interacción significativa indica que los factores no son independientes entre sí, y el conocimiento de la interacción es más útil que el conocimiento del efecto principal (Montgomery, 2001), por ello se analiza la interacción de los niveles de un factor dentro de cada nivel del otro factor. Las concentraciones de 1 y  $0.5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  en la solución Espinosa causaron mayor acumulación en parte aérea (919 y 852 ppm), diferentes estadísticamente de 0.75 y  $0 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  (Cuadro 6). En la solución Steiner la concentración de  $1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  causó mayor acumulación en parte aérea (733 ppm), diferente estadísticamente de  $0.5$  (606.5 ppm),  $0$  y  $0.75 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  (Cuadro 6).

**Cuadro 5.** Análisis de varianza para concentración de silicio en parte aérea

FV	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-valor	Pr>F
Solución nutritiva	514200.976	514200.976	150.87	<.0001*
Silicio	2552561.657	850853.886	249.65	<.0001*
Solución nutritiva*silicio	33279.870	11093.290	3.25	0.0343*
Error	109062.328	3408.198		
Total	3209104.831			

\*: significativo.

**Cuadro 6.** Comparación de medias de los niveles de silicio en cada nivel del factor solución nutritiva para la variable concentración de silicio en parte aérea.

mol m <sup>-3</sup>	Sol. Espinosa	mol m <sup>-3</sup>	Sol. Steiner
1	919.32 a	1	733.9 a
0.5	852.38 a	0.5	606.5 b
0.75	471.6 b	0	162.58 c
0	326.32 c	0.75	159.6 c

Medias con la misma letra no presentan diferencias, de acuerdo a la prueba de Tukey, con  $\alpha= 0.05$ .

La solución Espinosa causa mayor acumulación de silicio que la solución Steiner (Cuadro 7) en cada nivel de silicio, sin haber interacción entre soluciones nutritivas.

**Cuadro 7.** Comparación de medias del factor solución nutritiva en cada nivel del factor silicio para la variable concentración de silicio en parte aérea

	Silicio 0	Silicio 0.5	Silicio 0.75	Silicio 1
Espinosa	326.32 a	852.38 a	471.6 a	919.32 a
Steiner	162.58 b	606.5 b	159.6 b	733.9 b

Medias con la misma letra no presentan diferencias, de acuerdo a la prueba de Tukey, con  $\alpha= 0.05$ .



Los tratamientos sin aporte de silicio a la solución nutritiva presentaron una concentración promedio de 244 en parte aérea y 922 ppm en raíz (Cuadro 8). Posiblemente se debe a que este elemento está presente como impureza en 1) los reactivos utilizados para preparar la solución nutritiva, 2) el agua, aun cuando sea destilada o desmineralizada; 3) materiales de vidrio; y 4) el polvo; es muy difícil crear y mantener un ambiente libre de contaminación por silicio (Werner y Roth, 1983) citado por Parra (2004).

**Cuadro 8.** Efectos principales de la concentración de silicio y solución nutritiva sobre la concentración de silicio, potasio y calcio en parte aérea y raíz.

Factor	Si		K		Ca	
	Parte aérea	Raíz	Parte aérea	Raíz	Parte aérea	Raíz
$\text{SiO}_3^{2-}$ ( $\text{mol m}^{-3}$ )	-----(ppm)-----					
0.75	315.60	1200.01	20558 a	9503.1	3906.0 a	3209
0.5	729.44	1175.56	15836 a	8695.2	2162.2 b	12862
1	826.61	939.20	18243 a	12381.3	2835.8 ab	44668
0	244.45	922.31	15938 a	3902.4	2530.5 ab	253
$T_\alpha$	70.737	90.172	14244	1972.5	1677.6	5842
Espinosa	642.41	1112.25	19975 a	7787.6	3004.8 a	18981
Steiner	415.65	1006.29	15313 a	9453.4	2712.5 a	11515
$T_\alpha$	37.605	43.937	7572.2	1048.6	891.85	3105.7

Medias con la misma letra no presentan diferencias, de acuerdo a la prueba de Tukey, con  $\alpha = 0.05$ .  $T_\alpha$ : diferencia mínima significativa de Tukey.

### Concentración de silicio en la raíz

Existe una interacción significativa de las soluciones nutritivas con las concentraciones de silicio.

**Cuadro 9.** Análisis de varianza para concentración de silicio en la raíz.

FV	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-valor	Pr>F
Solución nutritiva	112275.216	112275.216	20.27	<.0001*
Silicio	665059.582	221686.527	40.03	<.0001*
Solución nutritiva*silicio	1490337.054	496779.018	89.70	<.0001*
Error	177226.012	5538.313		
Total	2444897.864			

\*: significativo.

En la solución Espinosa la concentración de 0.75 provocó diferencias estadísticas significativas (1332 ppm) contra 0, 1 y 0.5  $\text{mol m}^{-3}$ , mientras que en la solución Steiner 0.5  $\text{mol m}^{-3}$  (1432 ppm) causó diferencias respecto a 0.75, 1 y 0 (Cuadro 10). Contrario a lo que se esperaba, la alta concentración (1  $\text{mol m}^{-3}$ ) no produjo mayor acumulación en raíz, y el efecto de no aplicar silicio en la solución Espinosa produjo valores intermedios.

**Cuadro 10.** Comparación de medias de los niveles del factor silicio en cada solución nutritiva para la variable concentración de silicio en la raíz

$\text{mol m}^{-3}$	Sol. Espinosa	$\text{mol m}^{-3}$	Sol. Steiner
0.75	1332.68 a	0.5	1432.02 a
0	1191.5 b	0.75	1067.34 b



1	1005.72 c	1	872.68 c
0.5	919.1 c	0	653.12 d

Medias con la misma letra no presentan diferencias, de acuerdo a la prueba de Tukey, con  $\alpha = 0.05$ .

La solución Espinosa produjo los valores más altos de acumulación (con las concentraciones empleadas 0, 0.75 y 1) que la solución Steiner; excepto en la concentración 0.5 donde sucede lo contrario (Cuadro 11).

**Cuadro 11.** Comparación de medias de los niveles de solución nutritiva en cada nivel del factor silicio para la variable concentración de silicio en la raíz

	Silicio 0	Silicio 0.5	Silicio 0.75	Silicio 1
<b>Espinosa</b>	1191.5 a	919.1b	1332.68 a	1005.72 a
<b>Steiner</b>	653.12 b	1432.02 a	1067.34 b	872.68 b

Medias con la misma letra no presentan diferencias, de acuerdo a la prueba de Tukey, con  $\alpha = 0.05$ .

### Concentración de potasio en parte aérea

No se encontró interacción de los factores A y  $\beta$ , de acuerdo al análisis de varianza, con  $\alpha = 0.05$ . La concentración en parte aérea varió de 1.1966% a 2.23 %, esto concuerda con Jones (1991) que afirma que el potasio forma parte del 1 a 5% del peso seco del tejido foliar recién maduro con valores de suficiencia de 1.5 a 3% y con Zelaya (2002) que para chile manzano, durante la floración determinó 1.6% a 2.4%; y 1.9 % para etapa vegetativa, 2.1 a 2.8% durante la maduración de los frutos usando la solución nutritiva universal de Steiner. Mengel y Kirkby (1982) señalan que uno de los factores importantes en determinar la absorción de potasio es la morfología de las raíces y la absorción potencial de potasio que estas presenten, lo cual está definido genéticamente y por lo tanto varía según la especie y cultivar, esto puede explicar porqué la adición de silicio en las soluciones nutritivas no causó efecto significativo sobre la absorción de potasio. La temperatura y algunos factores internos afectan la absorción de este nutrimento. Gardner *et al.* (1985) y Marschner (1986) indican que, a temperaturas bajas, especialmente menores de 10° C, se reduce la absorción de K como resultado de una baja fluidez y alta permeabilidad de la membrana.

### Potasio en la raíz

El análisis de varianza (Cuadro 12), muestra que hay interacción entre los factores A y  $\beta$  del modelo estadístico, al rechazar la hipótesis nula de mayor orden, además que también fueron rechazadas las hipótesis nulas restantes.

**Cuadro 12.** Análisis de varianza para la variable concentración de potasio en la raíz

FV	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-valor	Pr>F
Solución nutritiva	27749779.3	27749779.3	10.47	0.0028*
Silicio	371886156.5	123962052.2	46.78	<.0001*
Solución nutritiva*silicio	174487781.9	58162594.0	21.95	<.0001*
Error	84803729.5	2650116.5		
Total	658927447.1			

\*: significativo.



La aplicación de 0.5 y 1 mol·m<sup>-3</sup> en la solución Espinosa favoreció la acumulación de potasio en la raíz, diferente estadísticamente de 0.75 y 0 mol·m<sup>-3</sup>. En el caso de la solución Steiner la aplicación de 1 y 0.75 mol·m<sup>-3</sup> favorecieron la acumulación de potasio en la raíz, diferentes estadísticamente de 0.5 y 0 mol·m<sup>-3</sup> (Cuadro 13).

**Cuadro 13.** Comparación de medias para los niveles del factor silicio en cada nivel del factor solución nutritiva para potasio en raíz.

mol·m <sup>-3</sup>	Sol Espinosa	mol·m <sup>-3</sup>	Sol Steiner
0.5	10124 a	1	15047.2 a
1	9715 a	0.75	12657.7 a
0.75	6348 b	0.5	7266.1 b
0	4962 b	0	2842.6 c

Medias con la misma letra no presentan diferencias, de acuerdo a la prueba de Tukey, con  $\alpha = 0.05$ .

La solución espinosa funciono mejor, favoreció la acumulación de potasio en la raíz para las concentraciones de 0 y 0.5 mol·m<sup>-3</sup>, mientras que Steiner para 0.75 y 1 mol·m<sup>-3</sup> (Cuadro 14).

**Cuadro 14.** Comparación de medias para los niveles del factor solución nutritiva en cada nivel del factor silicio para potasio en la raíz.

	Silicio 0	Silicio 0.5	Silicio 0.75	Silicio 1
Espinosa	4962.1 a	10124.3 a	6348.5 b	9715 b
Steiner	2842.6 b	7266.1 b	12657.7 a	15047 a

Medias con la misma letra no presentan diferencias, de acuerdo a la prueba de Tukey, con  $\alpha = 0.05$ .

### Concentración de calcio en parte aérea

El análisis de varianza para esta variable indica que no hay interacción de los factores; cada factor se comporta de manera independiente. Los efectos de los niveles de silicio difieren, esto se expresa en que la adición de 0.75 mol·m<sup>-3</sup> de SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup> causó mayor acumulación (3 906ppm) de calcio en parte aérea (Cuadro 8), estadísticamente diferente a la causada por la aplicación de 0, 1 y 0.5 mol·m<sup>-3</sup>. De acuerdo a lo obtenido por Gasga (2006), el contenido de calcio en la etapa de fructificación varia de 2.57 a 2.69%, valores superiores a los encontrados en este trabajo ya que se determinó de 0.2162 a 0.3906% en parte aérea.

### Concentración de calcio en raíz

Existe interacción del factor solución nutritiva con el factor silicio, según el análisis de varianza, por lo que es necesario analizar los niveles de un factor dentro de cada nivel del segundo factor (Cuadros 15 y 16).

La aplicación de la dosis más alta de SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (1 mol·m<sup>-3</sup>), causó mayor acumulación de calcio en ambas soluciones nutritivas, sin embargo, 0.5 mol·m<sup>-3</sup> causó el menor valor en la solución Steiner, mientras que en la solución Espinosa causó el segundo valor en orden decreciente. 0 y 0.75 mol·m<sup>-3</sup> en la solución Espinosa no fueron diferentes estadísticamente, similar a lo causado por 0 y 5 mol·m<sup>-3</sup> en solución Steiner (Cuadro 15). Se determinaron acumulaciones muy variables desde 0.02 % a 4.4 % de calcio en



la raíz, pero las mayores acumulaciones de este elemento se observan en los tratamientos con aplicación de  $1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  de  $\text{SiO}_3^{2-}$ , mientras que los valores menores se identifican en los tratamientos sin adición de  $\text{SiO}_3^{2-}$ .

**Cuadro 15.** Comparación de medias para los niveles del factor silicio en cada nivel del factor solución nutritiva para calcio en raíz.

$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$	Sol Espinosa	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$	Sol Steiner
1	49852 a	1	39484 a
0.5	25607 b	0.75	6278 b
0	326 c	0	181 b
0.75	140 c	0.5	117 b

Medias con la misma letra no presentan diferencias, de acuerdo a la prueba de Tukey, con  $\alpha=0.05$ .

La solución Espinosa no difiere estadísticamente de la solución Steiner, respecto a las concentraciones 0.5 y  $1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ , presentando mayores acumulaciones de calcio, por otra parte, en cuanto a las concentraciones de 0 y  $0.75 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  no se encontraron diferencias estadísticamente significativas (Cuadro 16).

**Cuadro 16.** Comparación de medias para los niveles del factor solución nutritiva en cada nivel del factor silicio para calcio en la raíz.

	Silicio 0	Silicio 0.5	Silicio 0.75	Silicio 1
Espinosa	325.7 a	25607 a	140.2 a	49852 a
Steiner	180.5 a	117 b	6277.9 a	39484 b

Medias con la misma letra no presentan diferencias, de acuerdo a la prueba de Tukey, con  $\alpha=0.05$ .

## Conclusiones

La adición de  $0.5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  de  $\text{SiO}_3^{2-}$  provocó un efecto benéfico sobre peso fresco, peso seco de parte aérea y peso seco total. El peso fresco y seco de raíz no fue afectado por la adición de silicio ni por el tipo de solución nutritiva empleada, los valores menores se obtuvieron en las soluciones nutritivas sin adición de silicio.

La solución nutritiva Espinosa produjo mayor acumulación de silicio en parte aérea, estadísticamente diferente que la solución Steiner, en la cual hubo menor acumulación; pero no influyó sobre la acumulación de potasio, ya que en esta no hubo efecto del tipo de solución nutritiva y en su acumulación en raíz se tuvo la más alta concentración empleando la solución Steiner. El mejor tratamiento para obtener la más alta concentración de silicio en parte aérea fue  $1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  en solución Espinosa (919.3 ppm), mientras que para la raíz la combinación adecuada es  $0.5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  en solución Steiner (1432 ppm). La adición de  $0.75 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  de  $\text{SiO}_3^{2-}$  causó mayor acumulación (3906 ppm) de calcio en parte aérea, estadísticamente diferente a la causada por la aplicación de 0, 1 y  $0.5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ . Se determinaron acumulaciones muy variables desde 0.02 % a 4.4 % de calcio en la raíz pero las mayores acumulaciones de este elemento se observan en los tratamientos con aplicación de  $1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  de  $\text{SiO}_3^{2-}$ , mientras que los valores menores se identifican en los tratamientos sin adición de  $\text{SiO}_3^{2-}$ .



## Referencias bibliográficas

- Adatia, M. H. and Besford, R.T. 1986. The effect of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. *Annals of Botany*, 56: 343-351.
- Alcántar G. G., Sandoval V. M. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo. Estado de México.
- Balasta, M. L. F. C., C. M. Perez., B. O. Juliano., C. P. Villareal., J. N. A. Lott y D. B. Roxas. 1989. Effect of silica level on some properties of *Oriza sativa* Straw and hull. *Can. J. Bot.* 67: 2356-2363.
- Barraza A. F. V. 2000. Crecimiento del chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.) en cuatro soluciones nutritivas bajo invernadero. Tesis de Maestría en Ciencias. Chapingo, México.
- Charles R. N. Kenneth V. T. 1999. Fundamental Concepts in the Design of Experiments. 5a Edición.
- Datnoff L. E., Rodrigues F. A. 2005. The role of silicon, in supressing rice diseases. APSnetFeatures February 2005.
- Domínguez C. L., García C. E. L. 1997. Caracterización fenológica y estudio del crecimiento de las plantas de chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.) en las condiciones ambientales de Chapingo, México. Tesis de Licenciatura. Chapingo, México.
- Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proc. NatlAcad. Sci. USA* 91:11-17.
- Epstein, E. 1999. Silicon. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50: 641-664.
- Gardner F. P. R. Brent P. R. L. Mitchell.1985. *Physiology of crops Plants*. Iowa State University Press, 237 p.
- Gasga P., R. 2006. Análisis de crecimiento y dinámica nutrimental del chile manzano (*Capsicum pubescens*). Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Jones, L. H. y K. A. Handreck. 1965. Studies of silica in the oat plant. III. Uptake of silica from soils by the plant. *Plant Soil* 23: 79-96.
- Jones Jr., J. B. Wolf B., Mills H. A. 1991. *Plant Analysis Hnadbook*. Micro-Macro Publishing, Inc. USA. 213 p.
- Marschner, H. 1986. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press. San Diego, CA. 674 p.
- Mengel, K.; E. A. Kirkby. 1982. *Principles of plant nutrition*. 3a edición. International PotashInstitute. Switzerland. 635 p
- Miyake, Y. and Takahashi, E. 1983. Effect of Silicon on the growth of solution-cultured cucumber plant. *SoilSci. Plant Nutr.* 29:71-83.
- Montgomery, D. C. 2001. *Design and Analysis of experiments*. 5a ed . Editorial Limusa.
- Parra T., S.; G. A. Baca C.; R. Carrillo G.; J. Kohashi S.; A. Martínez G. y C. Trejo L. 2004. Silicio y potencial osmótico de la solución nutritiva en el crecimiento de pepino. *Terra Latinoamericana* 22 (4): 467-473. México.



- Parra T., S.; A. Baca C.; R. Carrillo G.; J. Kohashi S.; A. Martinez G. y C. Trejo L. 2004. Comparación de tres métodos de análisis de silicio en tejido foliar de pepino. *Terra Latinoamericana* 22 (4): 401-407. México.
- Parra T., S.; A. Baca C.; J. L. Tirado T.; M. Villareal R.; P. Sánchez P. y S. Hernández V. 2008. Calidad del fruto, composición y distribución de elementos minerales en pepino en respuesta a silicio y al potencial osmótico de la solución nutritiva. *Terra Latinoamericana* 27:123-131.
- Pérez G., M. y R. Castro B. 2008. El chile manzano. Universidad Autónoma Chapingo. México. 128 p.
- Savant N. K., Snyder G. H., Datnoff L. E., 1997. Silicon management and sustainable rice production. *AdvAgron* 58: 151-199
- Takahashi, E. y Y. Miyake. 1982. The effects of silicon on the growth of cucumber plant. Comparative studies on the silicon nutrition. *Proceedings 9<sup>th</sup> Internacional Plant Nutrition Colloquium* 2:664-699.
- Zelaya M. L. X. 2002. Dinámica de la extracción nutrimental del chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.) Tesis de Maestría en Ciencias. Chapingo, México.