

CALIDAD DEL FRUTO, COMPOSICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS MINERALES EN PEPINO EN RESPUESTA A SILICIO Y AL POTENCIAL OSMÓTICO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA

Fruit Quality, Composition and Partitioning of Mineral Elements in Cucumber in Response to Silicon and the Osmotic Potential of Nutrient Solution

S. Parra Terraza^{1†}, G. A. Baca Castillo², J. L. Tirado Torres², M. Villarreal Romero¹, P. Sánchez Peña¹ y S. Hernández Verdugo¹

RESUMEN

Se realizó un experimento en invernadero para estudiar los efectos del silicio y el potencial osmótico (Ψ_s) de la solución nutritiva (SN), así como su interacción sobre la calidad del fruto, composición y distribución de elementos minerales en pepino desarrollado en soluciones nutritivas abastecidas en forma permanente con aire proveniente de bombas. Los tratamientos consistieron en nueve soluciones nutritivas resultantes de la combinación de dos factores: concentración de SiO_3^{2-} (0, 0.835 y 1.670 mol m^{-3}) y Ψ_s de la SN (-0.080, -0.115 y 0.150 MPa) en un diseño factorial completo 3^2 y una distribución de los tratamientos completamente al azar. La interacción de los factores silicio (Si) de la solución nutritiva incrementó significativamente la concentración de Si en las hojas superiores e inferiores y en los frutos, sin afectar la calidad de éstos. El aumento en dicho contenido fue debido a la concentración de Si dentro de cada conjunto de tres soluciones nutritivas con diferente potencial osmótico (-0.080, -0.115 y -0.150 MPa). Con un Ψ_s de -0.150 MPa, la materia seca y la firmeza del fruto aumentaron 17.7 y 51.5% con respecto a la SN con Ψ_s de -0.080 MPa. La combinación de la concentración alta de SiO_3^{2-} (1.670 mol m^{-3}) en las SN con un potencial osmótico bajo (-0.150 MPa) disminuyó las concentraciones de fósforo, potasio y calcio en las hojas superiores en un 74.75, 69.75 y 42.80%, respectivamente comparado con 0.835 mol SiO_3^{2-} m^{-3} ($\Psi_s = -0.115$ MPa).

Palabras clave: invernadero, hidroponía, análisis nutrimental, *Cucumis sativus* L.

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa. 80000 Culiacán, Sinaloa, México.

² Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

† Autor responsable (psaul@uat.uasnet.mx)

SUMMARY

A greenhouse experiment was conducted to study the effect of silicon and osmotic potential (Ψ_s) in the nutrient solution (NS), and their interaction, on fruit quality and distribution and composition of mineral elements of cucumber growing in nutrient solution supplied by continuous pumped air. A total of nine treatments resulted from the combination of two factors: SiO_3^{2-} concentration (0, 0.835 y 1.670 mol m^{-3}) and Ψ_s in the NS (-0.080, -0.115 y -0.150 MPa) in a 3^2 complete factorial design and complete randomized distribution of treatments. The interaction of silicon and osmotic potential in the NS significantly affected the silicon concentration in the upper and lower leaves and in fruit but did not affect fruit quality. The increase in silicon concentration was due to silicon concentration in each set of three nutrient solutions with different osmotic potential (0.080, 0.115 and -0.150 MPa). With an osmotic potential of -0.150 MPa, dry matter and fruit firmness increased significantly, 17.7 and 51.5% with respect to -0.080 MPa of the NS. The combination of a high nutrient solution concentration of SiO_3^{2-} (1.670 mol m^{-3}) and a low osmotic potential (-0.150 MPa) decreased phosphorus, potassium and calcium in the upper leaves by 74.75, 69.75 and 42.80%, respectively, compared with 0.835 mol SiO_3^{2-} m^{-3} ($\Psi_s = 0.115$ MPa).

Index words: greenhouse, soilless culture, nutrient analysis, *Cucumis sativus* L.

INTRODUCCIÓN

En Sinaloa se cultivan 1281 ha de hortalizas en invernadero y casa sombra (CIDH, 2007) y, en esta condición, una práctica común es la sustitución del suelo, cuya solución tiene una concentración de Si de 15 a 20 mg L^{-1} en promedio (Marchsner, 1995), por sustratos inertes, los cuales no aportan elementos químicos a las plantas (Abad y Noguera, 2000). En algunas

investigaciones se ha observado un efecto benéfico del Si sobre el crecimiento y desarrollo de plantas de diversas especies, cultivadas en condiciones de estrés abiótico (salinidad, acidez, toxicidad por Fe, Mn y Al) o biótico (plagas y enfermedades) (Epstein, 1999; FAO, 1990). Con respecto a lo anterior, la información obtenida mediante ensayos en hidroponía es escasa, y en ocasiones contradictoria ya que reportan respuesta positiva, negativa o nula, a la adición de Si, por parte de las plantas (Epstein, 1994; Marschner *et al.* 1990). Aunado a ello, no se ha evaluado la participación del Si en la calidad de los frutos de pepino, y considerando que la acumulación de Si se realiza principalmente en las paredes celulares y en los espacios intercelulares vegetales provocando una mayor rigidez (Epstein, 1994); por lo que es posible que el Si tenga una relación con algún componente físico de la calidad. Otro de los factores posiblemente relacionado con la absorción de silicio por las plantas y que no ha sido estudiado es el potencial osmótico (Ψ_s) de la solución nutritiva (SN), ya que al disminuir su valor, debido al incremento en el contenido de nutrientes, disminuye la energía libre del agua (Salisbury y Ross, 2000); por consiguiente, la absorción de agua y de algunos nutrientes por la planta puede ser afectada (Marschner, 1995), lo cual puede alterar su composición química (Steiner, 1973) y la calidad del fruto (Welles, 1999). El objetivo del presente trabajo fue investigar el efecto del Si y del Ψ_s de la SN, así como su interacción sobre la calidad del fruto, la concentración y distribución de elementos minerales en la planta de pepino.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en invernadero con temperaturas medias de 12 °C nocturna y 31 °C diurna. Se sembraron semillas de pepino tipo europeo cultivar Kalunga en contenedores de polietileno de forma cónica con volumen individual de 30 cm³, se utilizó como sustrato agrolita con granulometría de 1.0 a 3.6 mm. Los primeros tres días después de la siembra, los semilleros se regaron con agua destilada; los siete días siguientes se regó con la solución universal de Steiner (1984) a un potencial osmótico (Ψ_s) de -0.036 MPa; y, los 14 días posteriores se regó a -0.072 MPa. Se trasplantó 24 días después de la siembra y se colocó una planta por recipiente de 5 L, empleando un sistema hidropónico de cultivo en solución nutritiva abastecido en forma permanente con aire proveniente de bombas.

Los tratamientos consistieron en nueve SN (Cuadro 1), resultantes de la combinación de dos factores de estudio, ensayados a tres niveles cada uno: concentración de SiO₃²⁻ (0, 0.835 y 1.670 mol m⁻³) y Ψ_s de la SN (-0.080, -0.115 y -0.150 MPa). Se utilizó un diseño factorial completo 3² con arreglo de tratamientos en el invernadero en diseño completamente al azar con cuatro repeticiones. Las SN se prepararon con sales grado reactivo y agua destilada y se formularon a partir de modificaciones a la solución universal de Steiner, de acuerdo a lo descrito por Parra *et al.* (2004). El pH de las SN con Si fue ajustado a 5.3±0.3 con una mezcla de ácidos (HNO₃:H₃PO₄:H₂SO₄). Esta mezcla se valoró con Na₂CO₃, y se preparó en la proporción de 60: 5: 35, considerando los aportes (mmol L⁻¹) de NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y SO₄²⁻, y se realizaron las correcciones necesarias para no exceder los Ψ_s teóricos propuestos. En todas las SN, las concentraciones de los micronutrientes fueron de: 5, 1.6, 0.023, 0.011 y 0.865 mg L⁻¹ de Fe, Mn, Zn, Cu y B; el Fe se proporcionó como Fe-EDTA. El aporte de silicio se hizo con una solución de metasilicato de sodio (Na₂SiO₃·9H₂O), la cual fue valorada con ftalato ácido de potasio. Para evitar un estrés salino al momento del trasplante, las SN con Ψ_s de -0.115 y -0.150 MPa fueron incrementadas gradualmente a partir de -0.080 MPa hasta alcanzar sus concentraciones definitivas en un periodo de siete días (31 días después de la siembra). Diariamente se repuso el agua evapotranspirada aforando a 5 L con agua destilada y se ajustó el pH a 5.3±0.3 con la mezcla de ácidos; las SN se renovaron cada 10 días. La planta de pepino se condujo a un tallo, para ello se podaron los brotes laterales; las ramas, hojas y frutos por debajo de los 40 cm fueron suprimidas. Las plantas se despuntaron a los 60 días después de la siembra eliminando todo el material vegetal por encima de 1.60 m para facilitar su manejo. Los cortes de frutos se realizaron a los 73, 77 y 82 días después de la siembra y la calidad del fruto se evaluó en el último corte considerando las características: porcentaje de materia seca del fruto (MSF), firmeza del fruto (FF), sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT), conductividad eléctrica (CE) y pH. La MSF se determinó después de secar el fruto en la estufa a 70 °C durante 72 h; la firmeza del fruto con un penetrómetro Chatillan modelo PDV-30 con puntal cónico de siete mm de diámetro, cuyas lecturas son en kilogramos fuerza a la deformación del fruto. Los sólidos solubles totales (°Brix) se midieron con el refractómetro

Cuadro 1. Composición química y potencial osmótico (Ψ_s) de las soluciones nutritivas.

Tratamiento	NO_3^- †		H_2PO_4^-		SO_4^{2-}		SiO_3^{2-}		K^+		Ca^{2+}		Mg^{2+}		Na^+		Ψ_s
	----- mol m ⁻³ -----																MPa
1	13.33	13.33	1.11	1.11	7.78	7.78	0.00	0.00	7.78	7.78	10.00	10.00	4.44	4.44	0.00	0.00	-0.080
2	12.33	12.84	1.03	1.07	7.19	7.49	1.67	1.60	7.19	6.89	9.25	8.86	4.11	3.94	1.67	1.60	-0.080
3	11.33	12.39	0.94	1.03	6.61	7.23	3.33	3.06	6.61	6.07	8.50	7.81	3.78	3.47	3.33	3.06	-0.080
4	19.17	19.17	1.60	1.60	11.18	11.18	0.00	0.00	11.18	11.18	14.37	14.37	6.39	6.39	0.00	0.00	-0.115
5	17.73	18.46	1.48	1.54	10.34	10.77	2.40	2.29	10.34	9.90	13.30	12.73	5.91	5.66	2.40	2.29	-0.115
6	16.29	17.81	1.36	1.48	9.50	10.39	4.79	4.40	9.50	8.73	12.22	11.22	5.43	4.99	4.79	4.40	-0.115
7	25.00	25.00	2.08	2.08	14.58	14.58	0.00	0.00	14.58	14.58	18.75	18.75	8.33	8.33	0.00	0.00	-0.150
8	23.12	24.08	1.93	2.00	13.49	14.04	3.13	2.99	13.49	12.91	17.34	16.60	7.71	7.38	3.13	2.99	-0.150
9	21.25	23.24	1.77	1.94	12.40	13.55	6.25	5.74	12.40	11.38	15.94	14.63	7.08	6.50	6.25	5.74	-0.150

† La primera columna corresponde a las concentraciones propuestas y la segunda a las concentraciones definitivas al realizar los ajustes por pH y Ψ_s .

digital Atargo N1, y para la determinación de la acidez titulable (% ácido oxálico), CE y pH se pesaron 10 g de pulpa de pepino sin cáscara a los cuales se les extrajo el jugo con un extractor de jugos. Al jugo extraído se le añadió 50 mL de agua destilada y en la mezcla se midieron directamente la CE y el pH con un Conductronic PC-18; mientras que la acidez titulable se cuantificó titulando 10 mL de jugo con NaOH 0.01 N, para lo cual se utilizó fenolftaleína como indicador. Después del tercer corte de los frutos, las plantas se cosecharon separando en hojas superiores, hojas inferiores y tallos. Se consideró como hojas superiores a las ubicadas a una altura de 1 a 1.6 m; hojas inferiores a las ubicadas a una altura de 0.4 a 1 m. Este material vegetal se secó en la estufa con circulación forzada de aire a una temperatura de 70 °C durante 72 h, se molió en un molino eléctrico, se pasó a través de un tamiz con malla 40 y se determinaron las concentraciones de Si, P, K, Ca, Mg, Na y Zn. El Si se cuantificó por el método de fusión con NaOH (Kilmer, 1965) modificado por Elliott y Snyder (1991), y el resto de los nutrimentos se determinó mediante una digestión húmeda, con una mezcla de HNO_3 y HClO_4 (Alcántar y Sandoval, 1999) y su cuantificación se realizó en un espectrofotómetro de emisión con plasma acoplado (ICP-AES). El análisis de varianza de las variables de respuesta (calidad del fruto, concentración de Si en órganos vegetales, producción de materia seca total y concentración nutrimental en plantas de pepino) 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 Statistical Analysis System, Versión 8 (SAS Institute, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calidad de Frutos

La concentración de SiO_3^{2-} no afectó estadísticamente ninguna de las variables de calidad del fruto analizadas; no obstante, la aplicación de 0.835 mol SiO_3^{2-} incrementó la firmeza del fruto en 13.5% con relación a la SN sin SiO_3^{2-} (Cuadro 2). El porcentaje de materia seca del fruto (MSF) se incrementó conforme disminuyó el Ψ_s de la SN y el mayor valor (4.38%) se alcanzó con un Ψ_s de -0.150 MPa, mientras que el menor (3.72%) se obtuvo con -0.080 MPa (Cuadro 2). El incremento en la MSF de pepino probablemente se deba a la menor disponibilidad de agua para las plantas en la SN con el más bajo potencial hídrico (Ψ_s), lo cual provocó una disminución en el contenido de agua de los frutos; explicación propuesta por diversos investigadores para el caso del aumento de la materia seca en frutos de tomate (Ho y Adams 1994; Mitchell *et al.*, 1991; Adams y Ho, 1993). Con un Ψ_s de 0.115 y -0.150 MPa en la solución nutritiva la firmeza del fruto (FF) se incrementó significativamente 48.4 y 51.6%, respectivamente, comparado con -0.080 MPa.

Es posible que estos incrementos en la firmeza tengan relación con los aumentos en la materia seca de los frutos (Cuadro 2). El Ψ_s también afectó en forma significativa la CE del jugo del fruto, la mayor CE

Cuadro 2. Efecto de la concentración de SiO_3^{2-} y el potencial osmótico (Ψ_s) de la solución nutritiva sobre la materia seca del fruto (MSF), firmeza del fruto (FF), sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT), conductividad eléctrica (CE) y pH, en pepino 82 días después de la siembra.

Factor	SiO_3^{2-}	MSF	FF	SST	AT	CE	pH
	mol m^{-3}	%	kg	°Brix	%	dS m^{-1}	
	0.000	3.86 a	1.56 a †	3.98 a	0.064 a	0.46 a	5.64 a
	0.835	4.23 a	1.77 a	3.86 a	0.058 a	0.48 a	5.68 a
	1.670	4.10 a	1.64 a	4.02 a	0.062 a	0.49 a	5.65 a
Ψ_s (MPa)							
	-0.080	3.72 b	1.24 b	3.74 a	0.058 a	0.46 a b	5.69 a
	-0.115	4.06 a b	1.84 a	3.93 a	0.066 a	0.52 a	5.62 b
	-0.150	4.38 a	1.88 a	4.20 a	0.061 a	0.44 b	5.65 a
$\text{SiO}_3^{2-} * \Psi_s$		ns	ns	ns	ns	ns	**

†Medias con letras iguales dentro de cada columna no son estadísticamente diferentes, Tukey ($P \geq 0.05$); ns y * = no significativo y significativo, Tukey ($P \geq 0.05$).

(0.52 dS m^{-1}) se obtuvo con -0.115 MPa y la menor (0.44 dS m^{-1}) con -0.150 MPa. Comparando los Ψ_s de ambas soluciones, se esperaría que la CE de los frutos obtenidos con la SN de -0.150 MPa fuera mayor, por tener menos agua disponible y mayor cantidad de nutrientes, comparada con la SN de -0.115 MPa. Con esta solución, la concentración de K (22.0 g kg^{-1}) en el fruto disminuyó significativamente, comparado con -0.080 MPa (28.1 g kg^{-1}) y -0.150 MPa (28.0 g kg^{-1}) (Cuadro 3), por lo que es posible que este elemento, el cual tiene un efecto hidratante en la célula (Marschner, 1995) haya ocasionado una reducción en el contenido de agua del fruto incrementando su CE.

El pH del jugo del fruto de pepino mostró un efecto significativo del Ψ_s de la SN y de la interacción entre SiO_3^{2-} y Ψ_s (Cuadro 2). 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, 2002) por ello se analiza la interacción de los factores en la variable antes mencionada. Con la interacción de 0 $\text{mol SiO}_3^{2-} \text{ m}^{-3}$ y -0.080 MPa se obtuvo un pH de 5.77, valor significativo comparado con el pH de 5.58, obtenido con esa misma concentración de SiO_3^{2-} y un Ψ_s de -0.115 MPa; mientras que con 0 $\text{mol SiO}_3^{2-} \text{ m}^{-3}$ y -0.150 MPa.

Concentración de Si en Órganos Vegetales

La concentración de Si en las hojas superiores, hojas inferiores, tallos y frutos se incrementó significativamente por la concentración de SiO_3^{2-} en la SN; mientras que el Ψ_s de la SN aumentó, estadísticamente, la concentración de Si en hojas

inferiores y en el fruto (Cuadro 3). Estos contenidos, excepto el encontrado en el tallo, también resultaron significativamente afectados por la interacción de los factores SiO_3^{2-} y Ψ_s de la SN, razón por la cual se analizan y discuten directamente las consecuencias de dicha interacción en los contenidos antes indicados. La interacción de los factores de estudio: concentración de SiO_3^{2-} y Ψ_s de la SN, tuvo efecto significativo en la concentración de Si de las hojas superiores, hojas inferiores y frutos de pepino. Para las hojas superiores, a manera de ejemplo se indican dos gráficas de interacción (Figuras 1 y 2), hojas inferiores y frutos hubo aumento de dicho contenido debido a la concentración de SiO_3^{2-} (0, 0.835 y 1.670 mol m^{-3}) de la SN, dentro de cada conjunto de tres SN con diferente Ψ_s (-0.080, -0.115 y -0.150 MPa), para hojas superiores (Figura 1) y hojas inferiores, el aumento fue proporcional a la concentración de SiO_3^{2-} de la SN (Cuadro 3); mientras que para frutos el aumento no fue proporcional. Con relación a la concentración de Si en el fruto, éste aumentó significativamente por efecto de la adición de 1.670 $\text{mol SiO}_3^{2-} \text{ m}^{-3}$, comparado con la concentración media de Si: 0.835 $\text{mol SiO}_3^{2-} \text{ m}^{-3}$, únicamente dentro de las SN con el Ψ_s de -0.080 MPa (la más diluida) (Cuadro 3). La explicación al respecto es que los procesos de absorción de agua y de los iones de SiO_3^{2-} disueltos en ella, así como su ascenso a través de la planta hasta alcanzar el fruto, se dieron mediante flujo de masas y fueron favorecidos cuando el Ψ_s de la SN fue el mayor en estudio: -0.080 MPa, y también por la mayor concentración de SiO_3^{2-} en la solución. Por otra parte, se determinó que el Ψ_s de las SN con diferentes concentraciones de SiO_3^{2-} no afectó la concentración

Cuadro 3. Efectos principales e interactivos de la concentración de SiO_3^{-2} y el potencial osmótico (Ψ_s) de la SN sobre la concentración de Si en hojas superiores (HS) e inferiores (HI), tallos (T) y frutos (F) de pepino al momento de la cosecha (82 días después de la siembra).

Factor	Concentración de Si			
	HS	HI	T	F
	----- g kg ⁻¹ -----			
SiO_3^{-2} (mol m ⁻³)				
0.000	1.3 c [†]	1.8 c	0.4 c	0.3 c
0.835	9.0 b	11.6 b	0.9 b	0.7 b
1.670	18.5 a	21.7 a	1.6 a	1.5 a
Ψ_s (MPa)				
-0.080	8.6 a	10.7 b	0.8 a	0.7 b
-0.115	8.5 a	10.3 b	0.9 a	0.5 b
-0.150	10.0 a	12.3 a	1.1 a	1.2 a
$\text{SiO}_3^{-2} \times \Psi_s$	*	*	ns	*
0.000 x -0.080	0.99 c	1.60 c	0.34 c	0.45 cde
0.000 x -0.115	1.41 c	2.21 c	0.50 bc	0.07 e
0.000 x -0.150	1.43 c	1.71 c	0.38 c	0.32 de
0.835 x -0.080	8.70 b	10.90 b	0.92 abc	0.37 de
0.835 x -0.115	9.95 b	11.60 b	0.73 abc	0.60 bcde
0.835 x -0.150	8.00 b	12.64 b	1.25 abc	1.45 ab
1.670 x -0.080	18.70 a	22.70 a	1.28 abc	1.36 abc
1.670 x -0.115	15.91 a	19.50 a	1.67 ab	1.13 abcd
1.670 x -0.150	20.25 a	22.63 a	1.78 a	1.88 a
$\Psi_s \times \text{Si}$				
-0.080 x 0.000	0.99 c	1.60 c	0.34 c	0.45 cde
-0.080 x 0.835	8.70 b	10.90 b	0.92 abc	0.37 de
-0.080 x 1.670	18.70 a	22.70 a	1.28 abc	1.36 abc
-0.115 x 0.000	1.41 c	2.21 c	0.50 bc	0.07 e
-0.115 x 0.835	9.95 b	11.60 b	0.73 abc	0.60 bcde
-0.115 x 1.670	15.91 a	19.50 a	1.67 ab	1.13 abcd
-0.150 x 0.000	1.43 c	17.1 c	3.8 c	3.2 de
-0.150 x 0.835	8.00 b	12.64 b	1.25 abc	1.45 ab
-0.150 x 1.670	20.25 a	22.63 a	1.78 a	1.88 a

[†]Medias con letras iguales dentro de cada columna no son estadísticamente diferentes, Scheffe ($P \geq 0.05$); ns y * = no significativo y significativo, Scheffe ($P \geq 0.05$).

de Si en las hojas superiores (Figura 2) y hojas inferiores ni de los frutos, excepto en estos últimos con el nivel intermedio de SiO_3^{-2} (0.835 mol m⁻³) y un Ψ_s de -0.080 MPa comparado con -0.150 MPa (Cuadro 3); si el Ψ_s no afectó la absorción de Si, se deduce que la absorción de agua por la planta fue similar (Steiner, 1973; 1980). Tomando en cuenta que al cambiar el Ψ_s de la SN, se afecta indirectamente la concentración de SiO_3^{-2} de la misma, y que sin embargo los resultados no lo muestran así, a continuación se hace un análisis más detallado de los resultados anteriores considerando

únicamente a las hojas superiores siendo extensivo el análisis a las hojas inferiores y a los frutos. Las concentraciones promedio de Si en las hojas superiores de las plantas nutridas con la SN con las concentraciones siguientes de SiO_3^{-2} : 0, 0.835 y 1.670 mol m⁻³, fueron 1.3, 9.0 y 18.5 g kg⁻¹, respectivamente (Cuadro 3) y si no hubo efecto significativo por el Ψ_s , dentro de cada conjunto de tres SN con diferente concentración de SiO_3^{-2} ; esto implicaría que el Ψ_s no afectó el volumen de agua absorbida por la planta; sin embargo, se esperaba que conforme disminuyera el Ψ_s de la SN, se reduciría la absorción de agua de la planta (Steiner, 1973 y 1980), y por lo tanto, la concentración de Si de las hojas superiores. Al respecto, se tiene que las disminuciones del Ψ_s de -0.080 a -0.115, y de éste a -0.150 MPa fueron equivalentes a 43.75% del Ψ_s de partida (esto, si se parte de que el 100% es -0.080 MPa) y que para cada disminución del Ψ_s se tuvo en correspondencia un aumento en la cantidad de Si agregada a la SN de 0.364 mol SiO_3^{-2} m⁻³ (este valor corresponde al 43.6% del nivel de concentración de Si de la SN en estudio: 0.835 mol SiO_3^{-2} m⁻³), cantidad que se agregó para obtener el Ψ_s correspondiente requerido. Esto, independientemente de las cantidades agregadas para cumplir con los requerimientos de los tratamientos de concentración de SiO_3^{-2} de la SN; se deduce que tuvo lugar un efecto compensatorio cuando la planta absorbió un volumen menor de agua, debido al Ψ_s menor de la SN, también hubo disminución de la absorción de Si del disponible por efecto de volumen de agua. Sin embargo, dicha disminución se compensó, a partir de la cantidad de SiO_3^{-2} agregada para ajustar el Ψ_s de la SN, por lo que se considera que el acceso del Si a la raíz de la planta se debió a flujo de masas.

Distribución del Si en la planta

En esta investigación se observó que la distribución del Si en la planta, ordenado de mayor a menor concentración fue: hojas inferiores, hojas superiores, tallos y frutos. La mayor acumulación de Si en las hojas inferiores se interpreta como que este elemento al ser depositado como sílice amorfo ($\text{SiO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) no es removilizado y redistribuido a otras partes de la planta (Samuels *et al.*, 1991). Además de lo anterior, la acumulación de Si en las hojas y en los tallos es importante, ya que incrementa la resistencia de las plantas al ataque de plagas y enfermedades y al acame por acción del viento (Epstein, 1999).

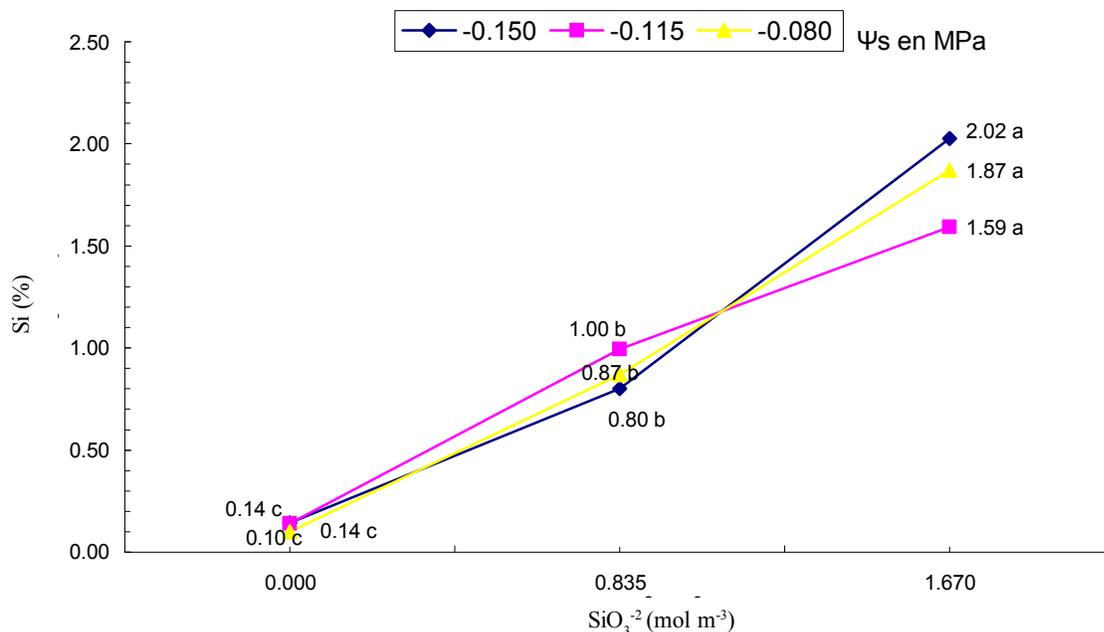


Figura 1. Efecto de silicio dentro de soluciones nutritivas con diferente potencial osmótico en la concentración de Si de las hojas superiores. Puntos con la misma letra en cada línea son iguales, Scheffe ($P \geq 0.05$).

Producción de Materia Seca Total

La concentración de SiO_3^{2-} en la SN no afectó en forma significativa la materia seca de la planta (MSP = tallos + hojas + frutos), mientras que el Ψ_s sí lo afectó

estadísticamente (Figura 3). Se observó una relación inversa entre el Ψ_s y el MSP; es decir, el valor menor de MSP se obtuvo con la SN con el mayor Ψ_s (-0.080 MPa) y el valor mayor de MSP con la SN de -0.150 MPa.

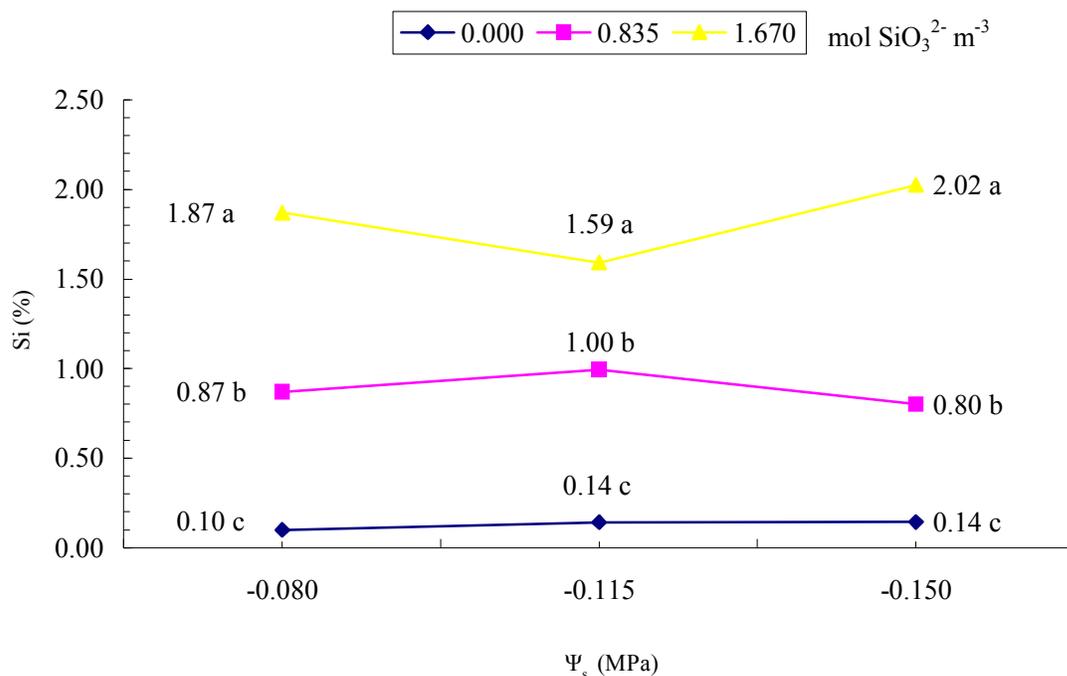


Figura 2. Efecto de potencial osmótico dentro de soluciones nutritivas con diferentes niveles de SiO_3^{2-} en el contenido de Si de las hojas superiores. Puntos con la misma letra en cada línea son iguales, Scheffe ($P \geq 0.05$).

Concentración nutrimental en plantas de pepino

Las concentraciones de P, K, Ca, Na y Zn de las hojas superiores, P y K del fruto de pepino, fueron significativamente afectados por los factores de estudio: concentración de SiO_3^{-2} y Ψ_s de la SN. Dichos contenidos, excepto el K en el fruto, también resultaron significativamente afectados por la interacción de los factores SiO_3^{-2} y Ψ_s (Cuadro 4), por lo que se analiza y discute la interacción en los contenidos antes mencionados.

Las concentraciones de P, K y Ca en las hojas superiores de pepino, a causa de las concentraciones de SiO_3^{-2} dentro de cada Ψ_s de las SN fueron estadísticamente iguales, excepto en el caso de las diferencias significativas del contenido obtenido por efecto de las concentraciones media y alta de SiO_3^{-2} : 0.835 y 1.670 mol m^{-3} , dentro de las SN con menor Ψ_s (-0.150 MPa) (Cuadro 4). Esta misma diferencia estadística también fue encontrada en la concentración de Si en las HS (Figura 2) entre las medias correspondientes a las concentraciones media y alta de SiO_3^{-2} : 0.835 y 1.670 mol m^{-3} , dentro del menor Ψ_s de la SN: -0.150 MPa (Cuadro 3); sólo que los valores correspondientes para este elemento aumentaron, cuando se incrementó la concentración de SiO_3^{-2} en la

SN, mientras que disminuyeron los correspondientes a P, K y Ca (Cuadro 4). Se infiere, que la alta cantidad de Si absorbida por la planta, cuando fue nutrida con la SN con mayor concentración de SiO_3^{-2} : 1.670 mol m^{-3} y el menor Ψ_s : -0.150 MPa, resultó fitotóxica a la planta, y la forma de manifestar dicho efecto fue disminuir las cantidades absorbidas de P, K y Ca con respecto a las correspondientes a condiciones no estresantes. Cabe señalar que el mayor peso de materia seca de planta (80.23 g), de los cuales 13.33 g corresponden a las hojas superiores, se obtuvo con el menor Ψ_s : -0.150 MPa (Figura 3), lo cual descarta que la concentración de Si en las hojas superiores se hubiera debido a un posible efecto de dilución. La interacción de los factores concentración de SiO_3^{-2} y Ψ_s de la SN, también tuvo efecto estadísticamente significativo en la concentración de Na de las hojas superiores pues hubo aumento de ésta debido a la concentración de SiO_3^{-2} de la SN (0, 0.835 y 1.670 mol m^{-3}) (cabe recordar que la fuente para proporcionar SiO_3^{-2} a la SN fue metasilicato de Na; $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), dicho aumento sólo fue significativo dentro del conjunto de tres SN con el mayor Ψ_s : -0.080 MPa (Cuadro 4); de éstos, el mayor contenido de Na en la hoja: 3.3 g kg^{-1} , se obtuvo con la concentración mayor de SiO_3^{-2} de la SN: 1.670 mol m^{-3} , y fue significativamente mayor con relación al obtenido con

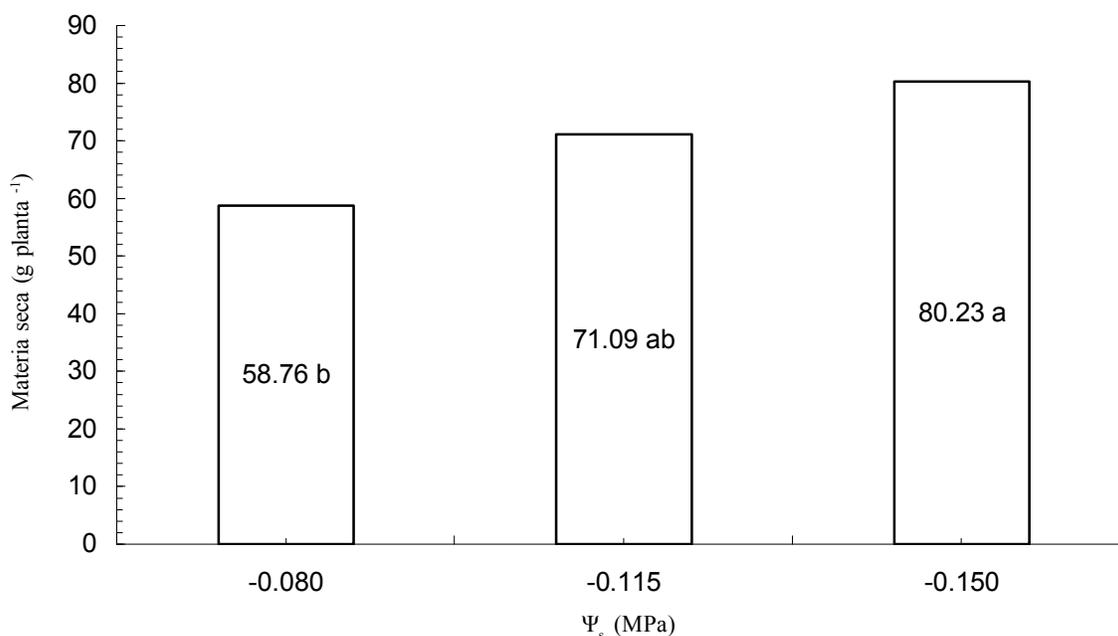


Figura 3. Efecto principal del Ψ_s de la SN sobre el peso seco (tallos + hojas + frutos) de la planta al momento de la cosecha (82 días después de la siembra). Medias con la misma letra son estadísticamente iguales, Tukey ($P \geq 0.05$).

Cuadro 4. Efectos principales y su interacción de los factores SiO_3^{2-} y potencial osmótico de la SN, sobre la concentración de nutrimentos minerales en hojas superiores y frutos de pepino 82 días después de la siembra.

Factor	P	K	Ca	Na	Zn	P [†]	K [§]
	----- g kg ⁻¹ -----						
SiO_3^{2-} (mol m ⁻³)							
0.000	6.6 ab [†]	17.6 b	29.0 a	0.4 c	0.02 a	8.3 a	26.7 a
0.835	6.8 a	19.0 a	26.3 ab	1.4 b	0.02 a	8.5 a	24.3 a
1.670	4.5 b	12.5 b	21.1 b	2.1 a	0.02 a	10.4 a	27.0 a
Ψ_s (MPa)							
-0.080	4.6 b	17.7 a	26.6 a	1.5 a	0.02 a	9.8 a	28.1 a
-0.115	6.3 ab	16.8 a	24.0 a	1.2 ab	0.01 b	8.7 a	22.0 b
-0.150	7.1 a	15.1 a	26.5 a	1.1 b	0.02 ab	8.6 a	28.0 a
$\text{SiO}_3^{2-} \times \Psi_s$							
0.000 x -0.080	4.9 bc	20.0 ab	26.7 ab	0.6 c	0.02 ab	8.5 b	30.6 a
0.000 x -0.115	5.6 abc	17.4 ab	25.0 ab	0.4 c	0.01 bc	7.7 b	21.1 a
0.000 x -0.150	9.2 ab	15.5 ab	35.2 a	0.4 c	0.02 ab	8.9 b	28.5 a
0.835 x -0.080	3.4 c	16.4 ab	24.6 ab	1.2 bc	0.01 bc	7.7 b	24.5 a
0.835 x -0.115	7.4 abc	17.4 ab	26.2 ab	1.3 bc	0.02 abc	8.6 b	21.0 a
0.835 x -0.150	10.3 a	24.8 a	28.5 ab	1.9 b	0.02 abc	9.7 b	28.2 a
1.670 x -0.080	5.7 abc	16.4 ab	29.2 ab	3.3 a	0.03 a	14.3 a	29.3
1.670 x -0.115	5.8 abc	15.3 ab	19.4 b	2.1 b	0.02 abc	10.1 ab	23.7 a
1.670 x -0.150	2.6 c	7.5 b	16.2 b	1.3 bc	0.01 c	7.6 b	27.4 a

[†] Medias con letras iguales dentro de cada columna y cada factor son iguales, Tukey ($P \leq 0.05$); [†] = Fósforo en frutos. [§] = Potasio en frutos.

la concentración de $0.835 \text{ mol SiO}_3^{2-} \text{ m}^{-3}$ (1.2 g kg^{-1}). Anteriormente, al discutir la concentración de Si de las hojas superiores se estableció que hubo una relación proporcional entre la concentración de SiO_3^{2-} de la SN y la de Si de dichas hojas, esta relación tuvo lugar en cada uno de los tres conjuntos de SN con diferente Ψ_s . En el caso del Na de las hojas superiores, la relación en cuestión, solamente tuvo lugar con el conjunto de SN con el mayor Ψ_s : -0.080 MPa (la SN con menor concentración total de iones) (Cuadro 4). La explicación al respecto se encuentra en la relación inversamente proporcional entre la movilidad de los iones y la fuerza iónica de las soluciones; así se tiene, que la movilidad de los iones Na^+ disminuyó conforme aumentó la fuerza iónica de la SN; lo cual impidió el libre acceso de los iones de Na a la raíz de la planta por flujo de masas, de las SN con concentración total de iones media y alta: -0.115 y -0.150 MPa , respectivamente (Skoog *et al.*, 2001). Otro efecto estadísticamente significativo del contenido de Na de las hojas superiores debido a la interacción de la concentración de SiO_3^{2-} y el Ψ_s de la SN, fue la mayor concentración de Na en las hojas superiores: 3.3 g kg^{-1} , la cual se obtuvo con la mayor concentración de SiO_3^{2-} de la SN: 1.670 mol m^{-3} y el mayor Ψ_s : -0.080 MPa ; tal contenido fue superior al

obtenido con el Ψ_s medio (-0.115 MPa) y el Ψ_s bajo (-0.150 MPa), 2.1 y 1.3 g kg^{-1} , respectivamente, (Cuadro 4); la explicación es que la absorción de agua por la planta fue mayor cuando el Ψ_s de la SN también fue el más alto en estudio (la SN más diluida), si además la concentración de Na de dicha solución fue la mayor, el resultado final fue mayor concentración de Na de la hoja. Con respecto a la concentración de Zn de las hojas superiores, se observó que el aumento en la concentración de SiO_3^{2-} de 0.835 a 1.670 mol m^{-3} en la SN con Ψ_s de -0.080 MPa , causó incremento significativo en la concentración de Zn. Sin embargo, con estas mismas concentraciones de SiO_3^{2-} pero con un Ψ_s de -0.150 MPa en la SN la concentración de Zn disminuyó 45.4% (Cuadro 4). Marschner *et al.* (1990) encontraron que al añadir Si a la SN (1.670 mM L^{-1}), sin estudiar el factor Ψ_s , aumentó significativamente la concentración de Zn en hojas jóvenes, maduras y viejas de pepino; dichos autores indican que el mecanismo mediante el cual en estas condiciones, el Si aumenta la disponibilidad fisiológica del Zn no es claro. La concentración de P en el fruto de pepino debido a las concentraciones de SiO_3^{2-} dentro de cada Ψ_s de las SN no fueron estadísticamente significativos, excepto en el caso de las diferencias significativas obtenidas por efecto

de las concentraciones media ($0.835 \text{ mol SiO}_3^{-2} \text{ m}^{-3}$) y alta ($1.670 \text{ mol SiO}_3^{-2} \text{ m}^{-3}$) dentro de las SN con menor Ψ_s (-0.080 MPa) con la que se obtuvo una concentración de P de 14.3 g kg^{-1} , lo cual sugiere que ocurrió sinergismo entre el P y el Si; excepto en el caso de las diferencias significativas obtenidas por efecto de los Ψ_s de -0.080 y -0.150 MPa dentro de las SN con $1.67 \text{ mol SiO}_3^{-2} \text{ m}^{-3}$ en donde las concentraciones de P fueron de 14.3 g kg^{-1} y 7.6 g kg^{-1} , lo que refleja una reducción del 46.8% en la concentración de P, posiblemente a causa de una fitotoxicidad provocada por el Si, ya que la mayor cantidad de Si absorbida por los frutos (18.8 g kg^{-1}) se obtuvo con la SN con mayor concentración de SiO_3^{-2} (1.670 mol m^{-3}) y el menor Ψ_s (-0.150 MPa) (Cuadro 4).

CONCLUSIONES

- La concentración de silicio en las hojas superiores e inferiores, tallos y frutos se incrementó significativamente al aumentar la concentración de SiO_3^{-2} en la solución nutritiva, sin repercutir en la calidad de los frutos. Con un potencial osmótico de -0.150 MPa en la solución nutritiva, la materia seca (4.38%) y la firmeza del fruto (1.88 kg fuerza) se incrementaron en forma significativa, 17.7 y 51.6% comparado con -0.080 MPa (3.72% y 1.24 kg fuerza respectivamente). La concentración de P, K y Ca en las hojas superiores de pepino disminuyeron cuando se suministró Si en las soluciones nutritivas con menor Ψ_s (-0.150 MPa). Se obtuvieron evidencias de que la concentración de Na de las hojas superiores fue consecuencia de la absorción mediante flujo de masas, de la concentración de Na en la solución nutritiva (el Na provino del metasilicato de Na aplicado como fuente de silicio); este efecto solamente se obtuvo con la solución nutritiva más diluida o con mayor potencial osmótico (-0.080 MPa).

LITERATURA CITADA

- Abad, B. M. y P. Noguera M. 2000. Los sustratos en los cultivos sin suelo. pp. 137-183. In: Manual de cultivo sin suelo. 2ª ed. Universidad de Almería. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Adams, P. and L. C. Ho. 1993. Effects of environment on the uptake and distribution of calcium in tomato on the incidence of blossom-end rot. *Plant Soil* 154: 127-132.
- Alcántar-González, G. y M. Sandoval-Villa. 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.
- CIDH (Comisión para la Investigación y la Defensa de las Hortalizas). 2007. Reporte 24. Inspección directa en campo. Temporada 2005-2006. Culiacán, Sinaloa, México.
- Elliott, C. L. and H. Snyder G. 1991. Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. *J. Agric. Food Chem.* 39: 118-119.
- Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 91: 11-17.
- Epstein, E. 1999. Silicon. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50: 641-664.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 1990. Soilless culture for horticultural crop production. Rome, Italy.
- Ho, L. C. and P. Adams. 1994. The physiological basis for high fruit yield and susceptibility to calcium deficiency in tomato and cucumber. *J. Hortic. Sci.* 69: 367-376.
- Kilmer, V. J. 1965. Silicon. pp. 959-962. In: C. A. Black (D. D. Evans, J. L. White, L. E. Ensminger y F. E. Clark (Eds.) *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- Marschner, H., H. Oberle., I. Cakmak, and V. Römheld. 1990. Growth enhancement by silicon in cucumber (*Cucumis sativus*) plants depends on imbalance in phosphorus and zinc supply. *Plant Soil* 124: 211-219.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd edition. Academic Press. San Diego, CA, USA.
- Mitchell, J. P., C. Shennan., S. R. Grattan, and P. M. May. 1991. Tomato fruit yield and quality under water deficit and salinity. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116: 215-221.
- 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: 467-473.
- Salisbury, F. B. y C. W. Ross. 2000. Fisiología de las plantas 1. Células: agua, soluciones y superficies. International Thomson Editores. Madrid, España.
- Samuels, A. L., A. D. M. Glass., D. L. Pret., and J. G. Menzies. 1991. Mobility and deposition of silicon in cucumber plants. *Plant Cell Environ.* 14: 485-492.
- SAS Institute. 1999. User's guide. Versión 6. 12. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Skoog D. A., D. M. West., F. G. Haller y S. R. Crouch. 2001. Química Analítica. McGraw-Hill. México, D. F.
- Steiner, A. A. 1973. The selective capacity of tomato plants for ions in a nutrient solution. ISOSC. Proceeding 3rd International Congress on Soilless Culture. Sassari, Italy.
- Steiner, A. A. 1980. The selective capacity of plants for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. ISOSC. Proceedings of the 5th International Congress on Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands.
- Steiner, A. A. 1984. The universal solution. pp. 633-649. In: Proc. Sixth International Congress on Soilless Culture. International Society for Soilles Culture. Lunteren, The Netherlands.
- Welles, G. W. 1999. Fruit quality of glasshouse cucumber (*Cucumis sativus* L.) as influenced by cultural factors. *Acta Hort.* 492: 113-119.