

NÍQUEL EN LA COMPOSICIÓN MINERAL Y EL RENDIMIENTO DE PIMIENTO MORRÓN (*Capsicum annuum* L.) CULTIVADO EN CASA SOMBRA

NICKEL IN THE MINERAL COMPOSITION AND YIELD OF BELL PEPPER (*Capsicum annuum* L.) GROWN IN A SHADE HOUSE

Saúl Parra-Terraza

Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa. Km 17.5, Carretera Culiacán-Eldorado, Culiacán, Sinaloa. (saul.parra@uas.edu.mx).

RESUMEN

El níquel (Ni) es un micronutriente para plantas superiores; la información sobre este elemento y sus efectos en el rendimiento de los cultivos agrícolas es escasa, lo cual contribuye a que los productores hortícolas de México no lo apliquen en sus sistemas de producción. El rendimiento de pimiento morrón (*Capsicum annuum* cv. Cannon) cultivado en casa sombra y riego por goteo se afecta por la aplicación de Ni^{2+} al alterar las concentraciones nutrimentales en los órganos vegetales. El objetivo de este estudio fue evaluar cuatro concentraciones de Ni^{2+} en solución nutritiva (SN) (0, 0.5, 1.0 y 1.5 mg L^{-1}) en la composición mineral y el rendimiento de pimiento morrón. El diseño experimental fue bloques completos al azar y cuatro repeticiones. Las variables evaluadas fueron la composición mineral de hojas, tallos y frutos, y peso, diámetro, longitud, número y el rendimiento de frutos (PF, DF, LF, NF y RF). Los resultados se analizaron con ANDEVA y los promedios se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). El Ni^{2+} disminuyó las concentraciones de Cu y Zn en hojas e incrementó las concentraciones foliares de Ni, Fe, Mg, y la de N en frutos. Aunque no hubo diferencias significativas en el rendimiento, la producción mayor (71.32 Mg ha^{-1}) se obtuvo con $1.0 \text{ mg Ni}^{2+} \text{ L}^{-1}$ en la SN, superior en 10.63 Mg ha^{-1} a la del tratamiento sin Ni^{2+} (60.69 Mg ha^{-1}). El níquel no se detectó en los frutos, los cuales pueden consumirse en fresco sin riesgos para la salud humana. La aplicación de $1.0 \text{ mg Ni}^{2+} \text{ L}^{-1}$ en la SN aumentó en 14.9% el rendimiento de pimiento morrón cultivado en casa sombra y riego por goteo.

Palabras clave: níquel, *Capsicum annuum*, micronutriente, antagonismo, casa sombra.

ABSTRACT

Nickel (Ni) is a micronutrient for higher plants; the information about this element and its effects on agricultural crops is scarce. Because of that, horticulture producers in Mexico do not apply Nickel in their production systems. The yield of bell pepper (*Capsicum annuum* cv. Cannon) grown in a shade house with drip irrigation is affected by the application of Ni^{2+} by altering the nutrimental concentrations in the plant organs. The objective of this study was to evaluate four concentrations of Ni^{2+} in nutritive solution (NS) (0, 0.5, 1.0 and 1.5 mg L^{-1}) in the mineral composition and yield of bell pepper. The experimental design was complete randomized blocks and four replications. The variables evaluated were the mineral composition of leaves, stems and fruits, along with weight, diameter, length, number and yield of fruits (PF, DF, LF, NF, and RF). The results were analyzed with ANOVA and the averages were compared with the Tukey test ($p \leq 0.05$). The Ni^{2+} reduced the concentrations of Cu and Zn in leaves and increased the foliar concentrations of Ni, Fe, Mg, and N in fruits. Although there were no significant differences in yield, highest production (71.32 Mg ha^{-1}) was obtained with $1.0 \text{ mg Ni}^{2+} \text{ L}^{-1}$ in the NS, higher by 10.63 Mg ha^{-1} than that of the treatment without Ni^{2+} (60.69 Mg ha^{-1}). The nickel was not detected in the fruits, which can be consumed fresh without risks for human health. The application of $1.0 \text{ mg Ni}^{2+} \text{ L}^{-1}$ in the NS increased by 14.9% the yield of bell pepper grown in a shade house using drip irrigation.

Key words: nickel, *Capsicum annuum*, micronutrient, antagonism, shade house.

INTRODUCTION

In 2014, 32.3 million Mg of green chilis were produced in 1.9 million ha in the world (FAOSTAT, 2017). In the same year, Mexico produced 2.45 million Mg in 129 476 ha; 19.8%

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.

Recibido: octubre, 2018. Aprobado: octubre, 2019.

Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia 54: 401-411. 2020.

INTRODUCCIÓN

En 2014 se produjeron 32.3 millones de Mg de chiles verdes en 1.9 millones de ha en el mundo (FAOSTAT, 2017). En el mismo año, México produjo 2.45 millones de Mg en 129 476 ha; al estado de Sinaloa corresponde el 19.8% de la producción y el 9.7% de la superficie sembrada (SIAP, 2017). En México se siembran aproximadamente 26 especies de chiles verdes, de ellas, la mayor producción es de pimienta morrón (*Capsicum annuum* L.). En 2016, 96% de la superficie cosechada de pimienta (3266 ha) se realizó en Sinaloa, y generó un valor de producción cercano a mil millones de pesos (SIAP, 2017).

El Ni es uno de los 17 nutrimentos esenciales para las plantas (Brown *et al.*, 1987); interviene en el metabolismo del N debido a que es un componente estructural de la enzima ureasa (EC 3.5.1.5) (Dixon *et al.*, 1975; Marschner, 2002). Esta enzima cataliza la hidrólisis de la urea, en el suelo o en la planta, y produce amonio y dióxido de carbono. El Ni participa en el metabolismo de los aminoácidos y del carbono (Bai *et al.*, 2006); contribuye al reciclamiento de H_2 producto de la fijación simbiótica del N por ser parte de la enzima hidrogenasa (EC 1.12.1.3), por lo tanto, un nivel bajo de Ni en los suelos agrícolas afecta la fijación simbiótica del N en leguminosas (Ruiz-Argüeso *et al.*, 2000).

Brown (2006) indicó que los factores principales que provocan una deficiencia de Ni en los cultivos son: 1) excesos de Cu y Zn que inhiben por competencia la absorción de Ni por las raíces, 2) pH del suelo mayor de 6.5 que aumenta los compuestos poco solubles de óxidos de Ni, 3) suelos con altos contenidos de Fe, Mn, Ca y Mg, 4) dosis excesivas de N o de cal agrícola, 5) niveles altos de P en el suelo que incrementan la formación de fosfato de Ni y, 6) inhibición de la enzima ureasa por la acumulación de Cu en las plantas. La deficiencia de Ni en las plantas provoca alteración en la síntesis de proteínas, reducción en el N total y una acumulación de urea, nitrato y aminoácidos (Brown *et al.*, 1990), todo lo cual origina síntomas de clorosis en las hojas y de necrosis en las células meristemáticas en cultivos como la soya (*Glycine max* L.) (Eskew *et al.*, 1984).

En cultivos de avena (*Avena sativa* L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.) se observó que la falta de Ni provoca inhibición del crecimiento y reducción en la formación de granos

de producción correspondiendo to the state of Sinaloa and 9.7% of the sown surface (SIAP, 2017). In Mexico, approximately 26 species of green chilis are sown, highest production corresponding to bell pepper (*Capsicum annuum* L.). In 2016, 96% of the harvested surface of this species (3266 ha) occurred in Sinaloa, generating a production value close to a billion pesos (SIAP, 2017).

Ni is one of the 17 essential nutrients for plants (Brown *et al.*, 1987); it intervenes in the metabolism of N due to the fact that it is a structural component of the enzyme urease (EC 3.5.1.5) (Dixon *et al.*, 1975; Marschner, 2002). This enzyme catalyzes the hydrolysis of urea, in the soil or in the plant, and produces ammonia and carbon dioxide. Ni participates in the metabolism of the amino acids and carbon (Bai *et al.*, 2006); it contributes to the recycling of H_2 , product of the symbiotic fixation of N due to being part of the enzyme hydrogenase (EC 1.12.1.3). Therefore, a low level of Ni in agricultural soils affects the symbiotic fixation of N in legumes (Ruiz-Argüeso *et al.*, 2000).

Brown (2006) indicated that the principal factors caused by a deficiency of Ni in crops are as follows: 1) Cu or Zn in excess, which inhibit by competition the uptake of Ni by the roots, 2) soil pH higher than 6.5 that increases Ni oxides, particularly low solubility compounds 3) soils with high contents of Fe, Mn, Ca and Mg, 4) excessive doses of N or of agricultural lime, 5) high levels of P in the soil which increase the formation of Ni phosphate, and 6) inhibition of the enzyme urease by the accumulation of Cu in the plants. The deficiency of Ni in the plants causes alteration in the synthesis of proteins, reduction in the total N and accumulation of urea, nitrate and amino acids (Brown *et al.*, 1990), which produce symptoms of chlorosis in the leaves and necrosis in the meristematic cells in crops such as soybean (*Glycine max* L.) (Eskew *et al.*, 1984).

In oat (*Avena sativa* L.), barley (*Hordeum vulgare* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) crops, it was observed that the lack of Ni provokes growth inhibition and reduction of grain formation (Brown *et al.*, 1990). Whilst, in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Ni increased yield, quality and nutrimental state of the fruits (Palacios *et al.*, 1998). Khoshgoftarmansh and Bahmanziari (2012) reported that the addition of 50 μM Ni^{2+} to the nutritive solution increased yield, total soluble solids and firmness of cucumber fruits (*Cucumis sativus* L.).

(Brown *et al.*, 1990). Mientras que, en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) el Ni aumentó el rendimiento, la calidad y el estado nutrimental de los frutos (Palacios *et al.*, 1998). Khoshgofarmanesh y Bahmanzari (2012) reportaron que la adición de 50 μM Ni^{2+} a la solución nutritiva aumentó el rendimiento, los sólidos solubles totales y la firmeza de los frutos de pepino (*Cucumis sativus* L.).

En suelos agrícolas los contenidos de Ni^{2+} varían de 3 a 1000 mg kg^{-1} (Cempel y Nickel, 2006), con promedio de 50 mg kg^{-1} (Liu *et al.*, 2011), aunque en suelos contaminados por Ni^{2+} las concentraciones de este elemento son de 200 a 26 000 mg kg^{-1} (Izosimova, 2005). El nivel foliar crítico de toxicidad de Ni en especies sensibles es mayor de 25 mg por kg de materia seca (Malavolta y Moraes, 2007). Un nivel adecuado es menor de 10 (Marschner, 2002), en especies moderadamente tolerantes es de 50 (Asher, 1991), y en plantas hiperacumuladoras es de 1000 (Pollard *et al.*, 2002).

Las raíces de las plantas absorben el Ni en forma de catión Ni^{2+} (Liu *et al.*, 2011) y lo incorporan a la biomasa aérea, de donde puede movilizarse a las semillas y a los frutos en forma de complejos con ácidos orgánicos (Brown, 2006). En México no hay información disponible sobre la influencia del Ni en el rendimiento de los cultivos agrícolas, por eso el objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de cuatro concentraciones de Ni^{2+} en la solución nutritiva en la composición mineral y el rendimiento de pimiento morrón desarrollado en casa sombra y con riego por goteo. Así, el conocimiento de las respuestas del pimiento al Ni^{2+} ayudará a diseñar acciones para su uso y manejo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en una casa sombra ubicada en Culiacán, Sinaloa, México a 24° 37' 29" N, 107° 24' 30" O, y 38 m de altitud. El suelo es tipo Vertisol Usterts (Soil Survey Staff, 2015), con capacidad de campo de 64%, punto de marchitamiento permanente de 39%, y humedad aprovechable de 25%, con base en el peso de suelo seco. El contenido de materia orgánica es 1.1%, pH 7.4, conductividad eléctrica 0.4 dS m^{-1} , capacidad de intercambio catiónico 71 cmol kg^{-1} , 0.07% N, 7 y 300 mg kg^{-1} de P y K, respectivamente; las concentraciones de micronutrientes ($\mu\text{g g}^{-1}$) son: Fe (6.6), Cu (1.9), Mn (13.7), Zn (0.6).

Semillas de pimiento morrón (*Capsicum annuum* cv. Cannon) se sembraron en charolas de poliestireno de 200 cavidades llenadas con turba, en condiciones de invernadero. Diez días

In agricultural soils the contents of Ni^{2+} vary from 3 to 1000 mg kg^{-1} (Cempel and Nickel, 2006), with an average of 50 mg kg^{-1} (Liu *et al.*, 2011), although in soils contaminated by Ni^{2+} the concentrations of this element are from 200 to 26 000 mg kg^{-1} (Izosimova, 2005). The critical foliar level of toxicity of Ni in sensitive species is higher than 25 mg per kg of dry matter (Malavolta and Moraes, 2007). An adequate level is lower than 10 (Marschner, 2002), in moderately tolerant species it is 50 (Asher, 1991), and in hyperaccumulating plants it is 1000 (Pollard *et al.*, 2002).

The roots of plants absorb the Ni in the form of cation Ni^{2+} (Liu *et al.*, 2011) and they incorporate it to the aboveground biomass, from where it can be mobilized to the seeds and the fruits in the form of complexes with organic acids (Brown, 2006). In Mexico there is no information available of the influence of Ni in yield of agricultural crops; therefore, the objective of this study was to determine the effect of four concentrations of Ni^{2+} in the nutritive solution on the mineral composition and yield of bell pepper grown in shade house and with drip irrigation. Thus, the knowledge of the responses of bell pepper to Ni^{2+} will help to design actions for its use and management.

MATERIALS AND METHODS

The study was carried out in a shade house located in Culiacán, Sinaloa, Mexico at 24° 37' 29" N, 107° 24' 30" W, and 38 m altitude. The soil is Vertisol Usterts (Soil Survey Staff, 2015), with 25% field capacity, permanent wilting point 39%, usable moisture 25%, based on dry soil weight. The content of organic matter is 1.1%, pH 7.4, electric conductivity 0.4 dS m^{-1} , cationic exchange capacity 71 cmol kg^{-1} , 0.07% N, 7 and 300 mg kg^{-1} of P and K, respectively; the concentrations of micronutrients ($\mu\text{g g}^{-1}$) are as follows: Fe (6.6), Cu (1.9), Mn (13.7), Zn (0.6).

Bell pepper seeds (*Capsicum annuum* cv. Cannon) were sown in polystyrene trays of 200 cavities filled with peat, under greenhouse conditions. Ten days after sowing (das), when the seedlings presented the first green leaf, and until 20 das, daily irrigation was applied with 50% NS (universal Steiner nutrient solution) (Steiner, 1984), from 21 to 31 das watering was made with 75% NS, from 32 to 43 das irrigation applied was 100% NS. NS was prepared with reactive grade organic salts and distilled water, and the following concentrations of micronutrients (mg L^{-1}) were added: Fe 2.5, Mn 0.5, B 0.5, Cu 0.02 and Zn 0.05 (Parra, 2016).

después de la siembra (dds), cuando las plántulas tenían la primera hoja verdadera y hasta los 20 dds se aplicó un riego diario con la SN universal de Steiner (Steiner, 1984) al 50%, de los 21 a los 31 dds se aplicó la SN al 75%, de los 32 a los 43 dds se aplicó la SN al 100%. La SN se preparó con sales inorgánicas grado reactivo y agua destilada y se añadieron las concentraciones de micronutrientes (mg L^{-1}) siguientes: Fe 2.5, Mn 0.5, B 0.5, Cu 0.02 y Zn 0.05 (Parra, 2016).

El trasplante de las plántulas se realizó 44 dds; el suelo se preparó con la remoción manual de residuos vegetales y malezas, se desmenuzaron los terrones con pala y azadón, y se formaron las camas separadas a 1.8 m; se instaló el riego por goteo con dos cintas regantes por cama y goteros cada 0.3 m con un gasto por gotero de 1 L h^{-1} ; las camas se acolcharon con polietileno bicolor blanco arriba y negro abajo; el trasplante se realizó a doble hilera en suelo húmedo después de un riego de 8 h, con distancias de 0.4 m entre plantas y 0.4 m entre hileras de plantas, para una densidad de 27 778 plantas ha^{-1} .

El criterio para definir las concentraciones de Ni^{2+} utilizadas fue considerar las concentraciones propuestas por Steiner (1984) para los micronutrientes Fe, Mn, Zn y B, las cuales varían de 0.2 a 2 mg L^{-1} . Los tratamientos estudiados fueron cuatro concentraciones de Ni^{2+} : 0, 0.5, 1 y 1.5 mg L^{-1} a partir de NiSO_4 y $6\text{H}_2\text{O}$, aplicados a la SN universal de Steiner, cuya composición química es la siguiente: 12, 1, 7, 7, 9 y 4 $\text{mol}_c \text{ m}^{-3}$ de NO_3^- , H_2PO_4^- , SO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , respectivamente (Steiner, 1984). La solución universal se complementó con las concentraciones de micronutrientes, descritas anteriormente. Las SN se prepararon con agua de riego con CE de 0.3 dS m^{-1} y pH de 7, clasificada como C1S1 (riesgo bajo de salinización y sodificación) (Ayers y Westcot, 1985); por lo tanto, los nutrientes presentes en el agua se consideraron en la formulación de las SN. El diseño experimental fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones; la unidad experimental correspondió a un surco de 6 m de largo y un área de 10.8 m^2 (6 m x 1.8 m); el rendimiento se evaluó en un área de 1.8 m^2 (seis plantas), en el centro de cada unidad experimental.

Los tratamientos se colocaron en cuatro depósitos de plástico de 200 L de capacidad, con un manejo en circuito abierto, sin reciclaje de las SN, las cuales se distribuyeron a las unidades experimentales por medio de cuatro bombas de 1 hp y cintas de riego. El crecimiento vertical de las plantas se apoyó con postes de madera de 8 cm de diámetro por 2.5 m de altura, distanciados 3 m e introducidos 30 cm en el suelo. Las plantas se sujetaron con hilos de rafia colocados horizontalmente uno sobre otro cada 30 cm, a lo largo de la hilera de plantas. Los primeros 30 ddt (días después del trasplante), el riego se aplicó cuando la tensión de humedad del suelo alcanzó valores de 12-15 kPa en los tensiómetros colocados a 15 cm de profundidad; después se regó cuando

The seedlings were transplanted at 44 das; the soil was prepared with manual removal of plant residue and weeds, clumps were broken up with a shovel and hoe, and the planting beds were separated at 1.8 m. Drip irrigation was installed with two drip hoses per bed and emitters every 0.3 m with a flow of 1 L h^{-1} per emitter. The beds were cushioned with bicolored polyethylene, white above and black below. Transplanting was carried out in double rows in moist soil after an irrigation of 8 h, with distances of 0.4 m between plants and 0.4 m between plant rows, with a density of 27 778 plants ha^{-1} .

The criterion for defining the concentrations of Ni^{2+} was to consider the concentrations proposed by Steiner (1984) for the micronutrients Fe, Mn, Zn and B, which vary from 0.2 to 2 mg L^{-1} . The treatments consisted of four concentrations of Ni^{2+} : 0, 0.5, 1 and 1.5 mg L^{-1} based on NiSO_4 and $6\text{H}_2\text{O}$, applied to the universal Steiner NS, whose chemical composition is as follows: 12, 1, 7, 7, 9 and 4 $\text{mol}_c \text{ m}^{-3}$ of NO_3^- , H_2PO_4^- , SO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} , respectively (Steiner, 1984). The universal Steiner solution was complemented with the aforementioned concentrations of micronutrients. The NS were prepared with irrigation water with CE of 0.3 dS m^{-1} and pH of 7, classified as C1S1 (low risk of salinization and sodification) (Ayers and Westcot, 1985). Therefore, the nutrients present in the water were considered in the formulation of the NS. The experimental design was of complete randomized blocks with four replications. The experimental unit was the furrow, 6 m length and an area of 10.8 m^2 (6 m x 1.8 m). Yield was evaluated in an area of 1.8 m^2 (six plants), in the center of each experimental unit.

Treatments were placed in four plastic containers of 200 L capacity, with open circuit management, without recycling of the NS, which were distributed to the experimental units by four 1 hp pumps and irrigation hose. The vertical growth of the plants was supported with wooden posts of 8 cm diameter by 2.5 m height, spaced at 3 m and introduced 30 cm in the soil. The plants were secured with raffia twine placed horizontally one over another every 30 cm, all along the plant row. Irrigation was applied after the first 30 dat (days after transplant) when the soil moisture tension reached values of 12-15 kPa in the tensiometers placed at 15 cm depth. Then, irrigation was applied when the average readings of the tensiometers placed at 15 and 30 cm in each experimental unit were from 15-18 kPa. In total the water level applied was 333 mm ($3330 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) during the crop cycle; and 539, 96, 357, 853, 479 and 122 kg ha^{-1} of N were applied in the form of NO_3^- , P, S, K, Ca and Mg, respectively.

In the final fruit cutting (164 dat), one plant per experimental unit was selected (four plants per treatment), which were sectioned by their different organs and dried at 70°C to constant weight, then ground and passed through a sieve of 0.5 mm diameter. The chemical analysis for quantifying the nutritional

las lecturas promedio de los tensiómetros colocados a 15 y 30 cm en cada unidad experimental fueron de 15-18 kPa; en total la lámina de agua usada fueron 333 mm (3330 m³ ha⁻¹) durante el ciclo del cultivo; y se aplicaron 539, 96, 357, 853, 479 y 122 kg ha⁻¹ de N en forma de NO₃⁻, P, S, K, Ca y Mg, respectivamente.

En el último corte de frutos (164 ddt) se seleccionó una planta por cada unidad experimental (cuatro plantas por tratamiento), las cuales se seccionaron en sus diferentes órganos y se secaron a 70 °C hasta peso constante, se molieron y se pasaron por un tamiz de 0.5 mm de diámetro. El análisis químico para cuantificar la concentración nutrimental en hojas, tallos y frutos, se realizó conforme a las metodologías propuestas por Motsara y Roy (2008), excepto el Ni que se evaluó por espectrofotometría de absorción atómica.

Los frutos se cosecharon cuando el 90% de la superficie era de color rojo, solo se registraron los frutos que medían al menos 6.4 cm de diámetro y longitud. La cosecha inició 90 ddt y finalizó 164 ddt. Los componentes del rendimiento registrados fueron: longitud, diámetro, peso y número de frutos por planta (LF, DF, PF y NF, respectivamente) y rendimiento de frutos (RF) por ha. El análisis de los datos incluyó ANDEVA y comparación de medias ($p \leq 0.05$), mediante el sistema computacional Statistical Analysis System v. 9.4 (SAS Institute, Inc., 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las diferencias en concentraciones de Mg en hojas, y de N en frutos fueron significativas ($p \leq 0.05$; Cuadro 1). Los tratamientos de 1.0 y 1.5 mg Ni²⁺ L⁻¹ aumentaron la concentración de Mg en las hojas comparado con 0 y 0.5 mg Ni²⁺ L⁻¹. Este resultado coincide con Yang *et al.* (1996) quienes reportaron que las concentraciones de Mg en hojas de col (*Brassica oleracea* L.) y de trébol blanco (*Trifolium repens* L.) no se redujeron en concentraciones menores de 7 mg Ni²⁺ L⁻¹ de solución. Sin embargo, difiere de Nishida *et al.* (2015) quienes informaron sobre una reducción en la absorción de Mg²⁺ en plantas de *Arabidopsis thaliana* L., debido a que Ni²⁺ y Mg²⁺ compiten por los sitios de unión eléctrica a nivel celular (Lock *et al.*, 2007), porque tienen la misma carga eléctrica (2⁺) y radios iónicos similares (0.69 Å y 0.72 Å, respectivamente) que afectan la entrada de Mg²⁺ al interior de la célula.

Degryse *et al.* (2012) en espinaca (*Spinacia oleracea* L.), Worms *et al.*, (2007) en algas verdes (*Chlamydomonas reinhardtii* L.) y Lock *et al.* (2007) en cebada reportaron que el Mg²⁺ disminuyó la entrada del Ni²⁺ a los sitios de transporte en la membrana

concentration in leaves, stems and fruits was performed according to the methodologies proposed by Motsara and Roy (2008), except the Ni, which was evaluated by spectrophotometry of atomic absorption.

The fruits were harvested when 90% of the surface was red, only the fruits that measured at least 6.4 cm diameter and length were registered. Harvest initiated at 90 dat and concluded 164 dat. Yield components registered were as follows: length, diameter, weight and number of fruits per plant (LF, DF, PF and NF, respectively) and fruit yield (RF) per ha. The analysis of data included ANOVA and comparison of means ($p \leq 0.05$), using the computational system Statistical Analysis System v. 9.4 (SAS Institute Inc., 2013).

RESULTS AND DISCUSSION

The differences in concentrations of Mg in leaves and of N in fruits were significant ($p \leq 0.05$; Table 1). The treatments of 1.0 and 1.5 mg Ni²⁺ L⁻¹ increased the concentration of Mg in the leaves compared with 0 and 0.5 mg Ni²⁺ L⁻¹. This result coincides with Yang *et al.* (1996), who reported that the concentrations of Mg in leaves of cabbage (*Brassica oleracea* L.) and of white clover (*Trifolium repens* L.) were not reduced in concentrations lower than 7 mg Ni²⁺ L⁻¹ of solution. However, this differs from Nishida *et al.* (2015) who reported a reduction in the uptake of Mg²⁺ in plants of *Arabidopsis thaliana* L., due to the fact that Ni²⁺ and Mg²⁺ compete for the sites of electric union at the cellular level (Lock *et al.*, 2007). Competition occurs because they have the same electric charge (2⁺) and similar ionic radii (0.69 Å and 0.72 Å, respectively) which affect the entrance of Mg²⁺ to the interior of the cell.

Degryse *et al.* (2012) in spinach (*Spinacia oleracea* L.), Worms *et al.* (2007) in green algae (*Chlamydomonas reinhardtii* L.) and Lock *et al.* (2007) in barley, reported that the Mg²⁺ diminished the entrance of Ni²⁺ to the transport sites in the cell membrane. The differences in the concentrations of Mg obtained by the above mentioned authors, and those reported in this study can be attributed to variations in the concentrations of Ni²⁺ (6 to 59 mg Ni²⁺ L⁻¹); the species of plants; the duration of the studies of nutrimental absorption (1 to 120 h); and the concentrations of Mg²⁺ (≤ 20 mM L⁻¹) used by cited researchers, compared to the conditions used in our study (164 d term, ≤ 1.5 mg Ni²⁺ L⁻¹ and 2 mM Mg²⁺ L⁻¹).

Cuadro 1. Suministro de Ni^{2+} en la solución nutritiva y las concentraciones de N, P, K, Ca y Mg en órganos de pimiento morrón.**Table 1. Supply of Ni^{2+} in the nutritive solution and the concentrations of N, P, K, Ca and Mg in organs of bell pepper.**

Órgano	Ni^{2+} (mg L^{-1})	N	P	K (g kg^{-1})	Ca	Mg
Hoja	0.0	24 a	3 a	37 a	5 a	1.0 b
	0.5	26 a	6 a	44 a	5 a	1.0 b
	1.0	20 a	4 a	41 a	6 a	1.3 a
	1.5	28 a	3 a	39 a	6 a	1.3 a
Tallo	0.0	24 a	3 a	19 a	5 a	1.7 a
	0.5	26 a	6 a	22 a	5 a	1.8 a
	1.0	20 a	4 a	22 a	6 a	1.5 a
	1.5	28 a	3 a	20 a	6 a	1.7 a
Fruto	0.0	15 b	12 a	22 a	5 a	0.6 a
	0.5	16 b	14 a	21 a	5 a	0.7 a
	1.0	13 b	13 a	18 a	5 a	0.8 a
	1.5	24 a	14 a	22 a	4 a	0.8 a

Valores medios con letra distinta indican diferencia estadística (Tukey; $p \leq 0.05$) ♦Mean values with different letter indicate statistical difference (Tukey; $p \leq 0.05$).

celular. Las diferencias en las concentraciones de Mg obtenidas por los investigadores antes mencionados, y las reportadas en este estudio, pueden atribuirse a variaciones en las concentraciones de Ni^{2+} (6 a 59 $\text{mg Ni}^{2+} \text{ L}^{-1}$); a las especies de plantas; a la duración de sus estudios de absorción nutrimental (1 a 120 h); y a las concentraciones de Mg^{2+} ($\leq 20 \text{ mM L}^{-1}$) usadas por estos investigadores y las utilizadas en este estudio (164 d de duración, $\leq 1.5 \text{ mg Ni}^{2+} \text{ L}^{-1}$ y $2 \text{ mM Mg}^{2+} \text{ L}^{-1}$).

La concentración mayor de N en hojas, tallos y frutos se obtuvo con 1.5 mg L^{-1} de Ni^{2+} , aunque solo fue significativa en frutos, lo cual coincide con Gad *et al.* (2007) quienes encontraron que el Ni aumentó la concentración de N en frutos de tomate. Esto puede atribuirse a que el Ni es indispensable para el metabolismo del N, la síntesis de proteínas y para regular la actividad de la enzima nitrato reductasa, por lo que un nivel adecuado de Ni contribuye al aumento del N total (Brown *et al.*, 1990). Kutman *et al.* (2013) y Siqueira *et al.* (2018) indicaron que el Ni aumenta la eficiencia en el metabolismo del N, e incrementa las concentraciones de este elemento en hojas y semillas de soya.

Por el contrario, una deficiencia de Ni afecta la síntesis de proteínas y reduce el N total (Brown *et al.*, 1990). Los niveles de Ni^{2+} en la SN afectaron

The highest concentration of N in leaves, stems and fruits was obtained with 1.5 mg L^{-1} of Ni^{2+} , although it was only significant in fruits, which coincides with Gad *et al.* (2007), who found that Ni increased the concentration of N in tomato fruits. This fact could be due to Ni is essential to N metabolism, to the synthesis of proteins and to regulate the activity of the enzyme nitrate reductase. Thus, an adequate level of Ni contributes to the increase of the total N (Brown *et al.*, 1990). Kutman *et al.* (2013) and Siqueira *et al.* (2018) indicated that Ni increases the efficiency of the metabolism of N, and increases the concentration of this element in leaves and seeds of soybean.

On the contrary, a deficiency of Ni affects the synthesis of proteins and reduces the total N (Brown *et al.*, 1990). The levels of Ni^{2+} in the NS affected ($p \leq 0.05$) the concentrations of Cu, Zn, Fe and Ni in leaves, and of Cu in stems (Table 2). The lowest concentrations of Zn in leaves, and of Cu in stems were obtained with $1 \text{ mg Ni}^{2+} \text{ L}^{-1}$ in the NS. The reductions of both cations reflect a competition for the same cellular transporter among these three ions. Our results coincide with Cataldo *et al.* (1978), who indicated an antagonism of the Cu^{2+} and Zn^{2+} over the Ni^{2+} , since both cations inhibited the absorption of Ni^{2+} in soybean plants, and in plants of cabbage,

($p \leq 0.05$) las concentraciones de Cu, Zn, Fe, y Ni en hojas, y de Cu en tallos (Cuadro 2). Las concentraciones menores de Zn en hojas, y de Cu en tallos se obtuvieron con 1 mg $\text{Ni}^{2+} \text{ L}^{-1}$ en la SN; las reducciones de ambos cationes reflejan una competencia por el mismo transportador celular entre estos tres iones. Nuestros resultados coinciden con Cataldo *et al.* (1978) quienes señalaron un antagonismo del Cu^{2+} y Zn^{2+} sobre el Ni^{2+} , ya que ambos cationes inhibieron la absorción de Ni^{2+} en plantas de soya, y en plantas de col, y maíz (*Zea mays* L.) (Yang *et al.*, 1996). Tang y Miller (1991) mencionaron antagonismo entre Ni^{2+} y Cu^{2+} en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), y Nishida *et al.* (2015) indicaron que a la absorción de Ni^{2+} la reduce el Zn^{2+} en *Arabidopsis thaliana* L., porque el mismo transportador absorbe ambos cationes.

Las concentraciones de Fe en las hojas aumentaron con los tratamientos de Ni, la mayor concentración de Fe se obtuvo con 1 mg $\text{Ni}^{2+} \text{ L}^{-1}$, la cual fue significativa ($p \leq 0.05$) comparada con 0 mg $\text{Ni}^{2+} \text{ L}^{-1}$ (Cuadro 2). Este resultado coincidió con los resultados de Matraszek *et al.* (2002), y Torres *et al.* (2016), quienes documentaron aumentos en las concentraciones de Fe provocadas por el Ni en hojas de maíz y espinaca, respectivamente. Nishida *et al.* (2011) encontraron que la aplicación de 50 μM Ni^{2+} aumentó

and maize (*Zea mays* L.) (Yang *et al.*, 1996). Tang and Miller (1991) mentioned antagonism between Ni^{2+} and Cu^{2+} in the rice crop (*Oryza sativa* L.), and Nishida *et al.* (2015) reported that the uptake of Ni^{2+} is reduced by Zn^{2+} in *Abidopsis thaliana* L., because the same transporter absorbs both cations.

The concentrations of Fe in the leaves increased with the treatments of Ni; the highest concentration of Fe was obtained with 1 mg $\text{Ni}^{2+} \text{ L}^{-1}$, which was significant ($p \leq 0.05$) compared with 0 mg $\text{Ni}^{2+} \text{ L}^{-1}$ (Table 2). This result coincided with the results of Matraszek *et al.* (2002), and Torres *et al.* (2016), who reported increases in the concentrations of Fe caused by the Ni in leaves of maize and spinach, respectively. Nishida *et al.* (2011) found that the application of 50 μM Ni^{2+} increased the accumulation of Fe in plants of *Arabidopsis thaliana*, due to the fact that the Ni^{2+} increased the uptake of Fe^{2+} through the roots by inducing the expression of the Fe transporter AtIRT1.

By contrast, Ahmad *et al.* (2011) in the sunflower (*Helianthus annuum* L.) crop, Rahman *et al.* (2005) in oats, Palacios *et al.* (1998) in tomato, and Matraszek *et al.* (2002) in lettuce (*Lactuca sativa* L.) registered that Ni decreased the concentrations of Fe in these crops, which they attributed to a competition for the sites of electric union at the cell level. The

Cuadro 2. Suministro de Ni^{2+} en la solución nutritiva y concentraciones de Cu, Mn, Fe, Zn y Ni en órganos de pimiento morrón.

Table 2. Supply of Ni^{2+} in the nutritive solution and concentrations of Cu, Mn, Fe, Zn and Ni in organs of bell pepper.

Órgano	Ni^{2+} (mg L^{-1})	Cu	Mn	Fe (mg kg^{-1})	Zn	Ni
Hoja	0.0	18.0 a	8.0 a	13.0 b	5.4 a	0.1 b
	0.5	8.3 b	7.0 a	20.0 ab	5.3 a	20.0 a
	1.0	6.0 b	8.0 a	23.0 a	3.0 b	23.0 a
	1.5	7.3 b	6.0 a	21.0 ab	4.9 ab	28.0 a
Tallo	0.0	5.4 a	5.0 a	14.0 a	6.0 a	nd [†]
	0.5	3.2 ab	5.0 a	15.0 a	6.0 a	nd
	1.0	2.6 b	4.0 a	24.0 a	5.0 a	nd
	1.5	3.5 ab	5.0 a	19.0 a	4.0 a	nd
Fruto	0.0	3.2 a	3.0 a	19.0 a	3.0 a	nd
	0.5	4.5 a	4.0 a	18.0 a	2.0 a	nd
	1.0	4.4 a	4.0 a	17.0 a	5.0 a	nd
	1.5	5.1 a	5.0 a	19.0 a	4.0 a	nd

Valores medios con letra distinta indican diferencia estadística (Tukey; $p \leq 0.05$); [†]nd = no detectado ♦
Mean values with different letter indicate statistical differences (Tukey; $p \leq 0.05$); [†]nd = not detected.

la acumulación de Fe en plantas de *Arabidopsis thaliana*, debido a que el Ni^{2+} aumentó la absorción de Fe^{2+} por las raíces al inducir la expresión del transportador de Fe AtIRT1.

En contraste, Ahmad *et al.* (2011) en el cultivo de girasol (*Helianthus annuum* L.), Rahman *et al.* (2005) en avena, Palacios *et al.* (1998) en tomate, y Matraszek *et al.* (2002) en lechuga (*Lactuca sativa* L.) registraron que el Ni disminuyó las concentraciones de Fe en estos cultivos, lo cual atribuyeron a una competencia por los sitios de unión eléctrica a nivel celular. El Ni^{2+} (0.69 Å) y Fe^{2+} (0.64 Å) tienen radios iónicos parecidos y se absorben vía el transportador de Fe IRT1 (Nishida *et al.*, 2011). Los aumentos o reducciones registrados en las concentraciones de Fe por efecto del Ni, quizás se relacionan con las diferencias en los materiales genéticos o las especies de plantas elegidas, los suelos o medios de cultivo y las concentraciones de Ni utilizadas, entre otros factores.

Los diferentes tratamientos afectaron de modo significativo ($p \leq 0.05$) la concentración de Ni en las hojas (Cuadro 2); hubo una relación directa entre la concentración de Ni^{2+} en las SN y la concentración de Ni en las hojas. La concentración mayor de Ni se obtuvo con 1.5 mg Ni^{2+} L⁻¹, la cual fue igual a 0.5 y 1 mg Ni^{2+} L⁻¹ pero estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) al tratamiento con 0 mg Ni^{2+} L⁻¹. Otros autores han documentado el aumento del Ni en la biomasa aérea de las plantas en respuesta a las concentraciones de Ni^{2+} en el medio de crecimiento vegetal (Cataldo *et al.*, 1978; Matraszek *et al.*, 2002; Nishida *et al.*, 2011; Mohammadzadeh *et al.*, 2014; Rathor *et al.*, 2014).

Las concentraciones de Ni, Ca y Mg en las hojas se correlacionaron en forma positiva (0.79, 0.56 y 0.66, respectivamente) y significativa ($p \leq 0.05$) con el Ni^{2+} en la solución nutritiva. Esta correlación positiva indica que al aumentar la concentración de Ni^{2+} en solución aumentaron las concentraciones de los nutrimentos antes mencionados; mientras que el Cu se correlacionó de manera negativa (-0.68) y significativa ($p \leq 0.01$) con el Ni^{2+} , porque la concentración de Cu en las hojas se redujo con los aumentos de Ni^{2+} en la solución nutritiva.

El Ni no se detectó en los frutos de pimiento, ya que la concentración menor cuantificada por absorción atómica en hojas fue de 0.1 mg kg⁻¹. Por lo tanto, el pimiento morrón tratado con Ni en este estudio

Ni^{2+} (0.69 Å) and Fe^{2+} (0.64 Å) have similar ionic radii and are absorbed via the Fe transporter IRT1 (Nishida *et al.*, 2011). The increments or reductions reported in the concentrations of Fe under the effect of Ni are related perhaps to the differences in the genetic materials or the plant species chosen, the soils or culture media and the concentrations of Ni used, among other factors.

The different treatments significantly affected ($p \leq 0.05$) the concentration of Ni in the leaves (Table 2); there was a direct relation between the concentration of Ni^{2+} in the NS and the concentration of Ni in the leaves. The highest concentration of Ni was obtained with 1.5 mg Ni^{2+} L⁻¹, which was equal to 0.5 and 1 mg Ni^{2+} L⁻¹, but statistically different ($p \leq 0.05$) from the treatment with 0 mg Ni^{2+} L⁻¹. Other authors have reported the increase of Ni in the aboveground biomass of the plants in response to the concentrations of Ni^{2+} in the plant growth medium (Cataldo *et al.*, 1978; Matraszek *et al.*, 2002; Nishida *et al.*, 2011; Mohammadzadeh *et al.*, 2014; Rathor *et al.*, 2014).

The concentrations of Ni, Ca and Mg in the leaves were correlated positively (0.79, 0.56 and 0.66, respectively) and significantly ($p \leq 0.05$) with the Ni^{2+} in the nutritive solution. This positive correlation indicates that, as the concentration of Ni^{2+} in solution was increased, there was an increase in the concentrations of the above mentioned nutrients; whereas the Cu was negatively (-0.68) and significantly ($p \leq 0.05$) correlated with the Ni^{2+} , because the concentration of Cu in the leaves was reduced with the increments of Ni^{2+} in the nutritive solution.

Ni was not detected in the pepper fruits, given that the lower concentration quantified by atomic absorption in the leaves was 0.1 mg kg⁻¹. Therefore, bell pepper treated with Ni in this study is a safe food for humans, whose maximum consumption is 1.33 mg Ni d⁻¹ for an adult with a weight of 66.6 kg (US-EPA, 1991). The highest fruit yield (71.32 Mg ha⁻¹) was obtained with 1.0 mg Ni^{2+} L⁻¹ in the NS (Table 3), equivalent to 3.33 kg Ni^{2+} ha⁻¹; this value was 10.63 Mg ha⁻¹ higher than the treatment without Ni^{2+} . However, ANOVA did not show significant effects in the yield nor in its components, because yield change was lower than the significant difference (14.26 Mg ha⁻¹) value.

es un alimento seguro para los seres humanos, cuyo consumo máximo es 1.33 mg Ni d⁻¹ para un adulto con peso de 66.6 kg (US-EPA, 1991). El rendimiento mayor de fruto (71.32 Mg ha⁻¹) se obtuvo con 1.0 mg Ni²⁺ L⁻¹ en la SN (Cuadro 3), equivalente a 3.33 kg Ni²⁺ ha⁻¹; valor superior en 10.63 Mg ha⁻¹ respecto al tratamiento sin Ni²⁺. Sin embargo, el ANDEVA no mostró efectos significativos en el rendimiento ni en sus componentes; porque el cambio en el rendimiento fue menor que el valor de diferencia significativa (14.26 Mg ha⁻¹).

CONCLUSIONES

El níquel (Ni²⁺) en la solución nutritiva redujo las concentraciones de cobre y zinc en las hojas de las plantas de pimiento morrón en casa sombra; pero aumentó las concentraciones de hierro en las hojas y de nitrógeno en los frutos.

La aplicación de 1 mg de níquel por litro de solución incrementó el rendimiento de frutos respecto al tratamiento sin níquel. El níquel no se acumuló en los frutos; por lo tanto, el pimiento morrón así fertilizado resultó un alimento seguro para los seres humanos.

LITERATURA CITADA

Ahmad, M.S.A., M. Ashraf, and M. Hussain. 2011. Phytotoxic effects of nickel on yield and concentration of macro and micronutrients in sunflower (*Helianthus annuum* L.) achenes. J. Hazard Mat. 185: 1295-1303.

Asher, C. J. 1991. Beneficial elements, functional nutrients, and possible new essential elements. In: Mortvedt J. J., F. R. Coz,

CONCLUSIONS

Nickel (Ni²⁺) in the nutrient solution reduced the concentrations of copper and zinc in the leaves of the bell pepper plants in a shade house; but increased the concentrations of iron in the leaves and of nitrogen in the fruits.

The application of 1 mg of nickel per liter of solution increased fruit yield in comparison to the treatment without nickel. The nickel did not accumulate in the fruits; therefore, this dose of Ni fertilization in bell pepper resulted safe for human consumption.

—End of the English version—



L. M. Shuman and R. M. Welch (eds.). Micronutrients in agriculture. Soil Science Society of America, Madison, WI. pp: 703-723.

Ayers, R.S., and D.W. Westcot. 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage. Paper 29 Rev.1, Roma. 174 p.

Bai, C., C. C. Reilly, and B. W. Wood. 2006. Nickel deficiency disrupts metabolism of ureides, amino acids, and organic acids of young pecan foliage. Plant Physiol. 140: 433-443.

Brown, P. H. 2006. Ni. In: Borker, A. V. and D. J. Pilbeam (eds.). Handbook of plant nutrition. CRC. Press, Boca Raton, FL. pp: 329-350.

Brown, P. H., R. M. Welch, and E. E. Cary. 1987. Nickel a micronutrient essential for all higher plants. Plant Physiol. 85: 801-803.

Cuadro 3. Suministro de Ni²⁺ en la solución nutritiva en el peso del fruto (PF), diámetro de fruto (DF), longitud del fruto (LF), número de frutos (NF) y rendimiento de fruto (RF) de pimiento morrón.

Table 3. Supply of Ni²⁺ in the nutritive solution in fruit weight (PF), fruit diameter (DF), fruit length (LF), number of fruits (NF) and yield of fruits (RF) of bell pepper.

Ni ²⁺ (mg L ⁻¹)	PF (g)	DF (cm)	LF (cm)	NF (Mg ha ⁻¹)	RF (Mg ha ⁻¹)
0	177.5	7.9	9.0	11	60.69
0.5	173.5	8.1	8.8	10	58.61
1.0	155.0	8.1	8.6	13	71.32
1.5	189.0	8.2	8.7	12	67.30

No hubo diferencia significativa entre tratamientos (Tukey; p>0.05) ♦ There were no significant differences among treatments (Tukey; p>0.05).

- Brown, P. H., R. M. Welch, and J. T. Madison. 1990. Effect of nickel deficiency on soluble anion, amino acid, and nitrogen levels in barley. *Plant Soil* 125: 19-27.
- Cataldo, D. A., T. R. Garland, and R. E. Wilding. 1978. Nickel in plants. I. Uptake kinetics using intact soybean seedlings. *Plant Physiol.* 62: 563-565.
- Cempel, M., and G. Nikel. 2006. Nickel: a review of its sources and environmental toxicology. *Pol. J. Environ. Stud.* 15: 375-382.
- Degryse, F., A. Shahbazi., L. Verheyen, and E. Smolders. 2012. Diffusion limitations in root uptake of cadmium and zinc, but not nickel, and resulting bias in the Michaelis constant. *Plant Physiol.* 160: 1097-1109.
- Dixon, N. E., C. Gazzola, R. L. Blakeley, and R. Zerner. 1975. Jack bean urease. (EC 3.5.1.5). Metalloenzyme. Simple biological role for nickel. *J. Am. Chem. Soc.* 97: 4131-4133.
- Eskew, D. L., R. M. Welch, and W. A. Cieslak. 1984. Nickel in higher plants: further evidence for an essential role. *Plant Physiol.* 76: 691-693.
- FAOSTAT. 2017. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Base de datos. Disponible en <http://faostat.fao.org> (Consultado: octubre 2017).
- Gad, N., M. H. El-Sherif, and N. H. M. El-Gereedy. 2007. Influence of nickel on some physiological aspects of tomato plants. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 1: 286-293.
- Izosimova, A. 2005. Modelling the interactions between calcium and nickel in the soil-plant system. *FAL Agricultural Research Special Issue.* pp: 288-299.
- Khoshgoftarmanesh, A. H., and H. Bahmanziari. 2012. Stimulating and toxicity effects of nickel on growth, yield and fruit quality of cucumber supplied with different nitrogen sources. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 175: 474-481.
- Kutman, B. Y., U. B. Kutman, and I. Cakmak. 2013. Nickel-enriched seed and externally supplied nickel improve growth and alleviate foliar urea damage in soybean. *Plant Soil* 363: 61-75.
- Liu, G., E. H. Simonne, and Y. Li. 2011. Nickel nutrition in plants. HS1191. Serie Horticultural Science UF/IFAS Extension. University of Florida. Florida, USA. 6 p.
- Lock, K., H. van Eeckhout., K. A. de Schampelaere., P. Criel, and C. R. Janssen. 2007. Development of a biotic ligand model (BLM) predicting nickel toxicity to barley (*Hordeum vulgare* L.). *Chemosphere* 66: 1346-1352.
- Malavolta, E., and M. F. Moraes. 2007. Ni-from toxic a nutrient essential. *Better Crops with Plant Food* 91: 26-27.
- Marschner, H. 2002. Mineral Nutrition of Higher Plants. Second Edition. Academic Press, London. 889 p.
- Matraszek, R., M. Szymanska, and M. Wroblewska. 2002. Effect of nickel on yielding and mineral composition of the selected vegetables. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* 1: 13-22.
- Mohammadzadeh, A., M. Tavakoli, M. R. Chaichi, and B. Motesharezadeh. 2014. Effects of nickel and PGPB on growth indices and phytoremediation capability of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Arch. Agron. Soil Sci.* 60: 1765-1778.
- Motsara, M. R., and R. N. Roy. 2008. Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* 19. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 219 p.
- Nishida, S., Ch. Tsuzuki, A. Kato, A. Aizu, J. Yoshida, and T. Mizuno. 2011. AtIRT1, the primary iron uptake transporter in the root mediates excess nickel accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Physiol.* 52: 1433-1442.
- Nishida, S., A. Kato, Ch. Tsuzuki, J. Yoshida, and T. Mizuno. 2015. Induction of nickel accumulation in response to zinc deficiency in *Arabidopsis thaliana*. *Int. J. Mol. Sci.* 16: 9420-9430.
- Palacios, G., I. Gómez, A. Carbonell-Barrachina, J. Navarro P, and J. Mataix. 1998. Effect of nickel concentration on tomato plant nutrition and dry matter yield. *J. Plant Nutr.* 21: 2179-2191.
- Parra T. S. 2016. Relaciones cloruro/aniones y sodio/cationes en soluciones nutritivas y la composición mineral de dos cultivos de tomate. *Terra Latinoamericana* 34: 219-227.
- Pollard, A. J., K. D. Powell, H. A. Harper, and J. A. C. Smith. 2002. The genetic basis of metal hyperaccumulation in plants. *Crit. Rev. Plant Sci.* 21: 539-566.
- Rahman, M. H., S. Sabreen, S. Alam, and S. Kawai. 2005. Effect of nickel on growth and composition of metal micronutrients in barley plants grown in nutrient solution. *J. Plant Nutr.* 28: 393-404.
- Rathor, G., N. Chopra, and T. Adhikari. 2014. Effect of variation in nickel concentration on growth of maize plant: A comparative overview for Pot and Hoagland culture. *Res. J. Chem. Sci.* 4: 30-32.
- Ruiz-Argueso, T., J. Imperial, and J. M. Palacios. 2000. Uptake hydrogenases in root nodule bacteria. *In: Triplett, E. W. (ed.). Prokaryotic nitrogen fixation: a model system for analysis of a biological process.* Horizon Scientific Press, Wymondham, U. K. pp: 489-507.
- SIAP 2017. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en <http://www.siap.gob.mx> (Consultado: marzo 2018).
- SAS 2013. Statistical Analysis System Institute. SAS Proceeding Guide, Versión 9.4. SAS Institute. Cary, NC. USA
- Siqueira, F. D., B. Wurr R, A. Rodríguez dos Reis, F. de Barros Reis, T. Soares de Carvalho, J. Schulze, M. A. Carbone, and L. R. Guimaraes. 2018. Hidden nickel deficiency? Nickel fertilization via soil improves nitrogen metabolism and grain yield in soybean genotypes. *Front. Plant Sci.* 9: 1-16.
- Soil Survey Staff. 2015. Illustrated guide to soil taxonomy, version 2. U. S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, Nebraska. 681 p.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. *In: Proceeding 6th. International Congress on Soilless Culture.* Wageningen, The Netherlands. pp: 633-650.
- Tang, T., and D. M. Miller. 1991. Growth and tissue composition of rice grown in soil treated with inorganic copper, nickel and arsenic. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 22: 2037-2045.
- Torres, G. N., S. L. Camargos, O. L. D. S. Weber, K. D. B. Mass, and W. L. M. P. Scaramuzza. 2016. Growth and micronutrient concentration in maize plants under nickel and lime applications. *Rev. Caatinga* 29: 796-804.
- US-EPA (United States Environmental Protection Agency). 1991. Integrated Risk Information System. Nickel, soluble salts: CASRN Various. Washington. USA. Disponible en: https://cfpub.epa.gov/ncea/iris2/chemicalLanding.cfm?substance_nmbr=271 (Consultado: enero 2018).

- Worms, I. A. M., N. Parthasarathy, and K. J. Wilkinson. 2007. Ni Uptake by a green alga. 1. Validation of equilibrium model for complexation effects. *Environ. Sci. Technol.* 41: 4258-4263.
- Yang, X., B. C. Valigar, D. C. Martens, and R. B. Clark. 1996. Plant tolerance to nickel toxicity. II. Nickel effects on influx and transport of mineral nutrients in four plant species. *J. Plant Nutr.* 19: 265-279.