

Relaciones magnesio y nitrógeno en soluciones nutritivas y el rendimiento de pepino en sistema hidropónico cerrado

Magnesium and nitrogen ratios in nutrient solutions and cucumber yield in closed hydroponic system

Saúl Parra-Terraza^{1*} , Azareel Angulo-Castro¹ ,
Carlos Fabián López-Rodas¹ y Jesús Enrique Retes-Manjarrez¹ 

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agronomía. Carretera Culiacán-El Dorado km 17.5, campo El Diez. 80398 Culiacán, Sinaloa, México.

* Autor para correspondencia (saul.parra@uas.edu.mx)

Editor de Sección: Dr. Gelacio Alejo Santiago

RESUMEN

Soluciones nutritivas con balance en las relaciones, proporciones y concentraciones de los iones optimizan la eficiencia en el uso de nutrimentos y el rendimiento de los cultivos. El objetivo de este trabajo fue evaluar, en invernadero, tres relaciones porcentuales Mg^{2+} /cationes (20, 40 y 60/100) y tres de NO_3^- /aniones (40, 60 y 80/100) y su combinación sobre la composición mineral, la eficiencia de uso de nutrimentos (EUN) y el rendimiento de pepino (*Cucumis sativus* cv. Poinsett 76) desarrollado en hidroponía en circuito cerrado. El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial de tratamientos 3^2 y seis repeticiones. Las variables evaluadas fueron la composición mineral de hojas, tallos y frutos, EUN, peso, diámetro, longitud, número, y rendimiento de fruto. Los resultados se analizaron con ANDEVA y los promedios se compararon con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). El rendimiento superior fue con la combinación 20/100 Mg^{2+} y 60/100 NO_3^- , relaciones mayores de Mg^{2+} (40 y 60/100) y de NO_3^- (80/100) redujeron el rendimiento 33.4%, 30.7% y 20.6%, respectivamente, y disminuyeron la eficiencia de Mg y N, respecto a 20/100 Mg^{2+} y 60/100 NO_3^- . La relación 60/100 Mg^{2+} aumentó la concentración nutrimental de Mg en los frutos, pero disminuyó el rendimiento.

Palabras clave: composición mineral, *Cucumis sativus* L., interacción, uso eficiente de nutrimentos.

SUMMARY

Nutrient solutions with balance in ion ratios, proportions and concentrations optimize nutrient use efficiency and crop yield. The objective of this study is to evaluate under greenhouse conditions three percentage ratios Mg^{2+} (20, 30 and 40/100) and three of NO_3^- (40, 60 and 80/100) and their combination on the mineral composition, nutrient use efficiency (EUN) and the yield of cucumber (*Cucumis sativus* cv. Poinsett 76) developed in hydroponics. The experimental design was completely randomized with a factorial arrangement of 3^2 treatments and six replicates. The variables evaluated were mineral composition of leaves, stems and fruit, efficiency in the use of nutrients, and weight, diameter, length, number, and yield of fruit. The results were analyzed with the analysis of variance (ANOVA) and the means were compared with Tukey's test ($P \leq 0.05$). The superior yield was with the combination 20/100 Mg^{2+} and 60/100 NO_3^- , higher ratios of Mg^{2+} (40 and 60/100) and NO_3^- (80/100) reduced yield 33.4%, 30.7% and 20.6%, respectively, and decreased the efficiency of Mg and N, compared to 20/100 Mg^{2+} and 60/100 NO_3^- . The 60/100 Mg^{2+} ratio increased the nutrient concentration of Mg in the fruit, but decreased yield.

Index words: mineral composition, *Cucumis sativus* L., interaction, nutrient efficiency use.

Cita recomendada:

Parra-Terraza, S., Angulo-Castro, A., López-Rodas, C. F. y Retes-Manjarrez, E. (2022). Relaciones magnesio y nitrógeno en soluciones nutritivas y el rendimiento de pepino en sistema hidropónico cerrado. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-13. e1048. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1048>

Recibido: 27 de septiembre de 2021. Aceptado: 2 de septiembre de 2022.
Artículo. Volumen 40, noviembre de 2022.

INTRODUCCIÓN

En 2020 se produjeron 87.8×10^6 toneladas de pepino en 2.2×10^6 ha en el mundo (FAOSTAT, 2017). En el mismo año, México produjo 1.1×10^6 Mg en 22 314 ha, de estos 31.0 y 15.2%, respectivamente, correspondieron al estado de Sinaloa (SIAP, 2021). En México la producción de pepino en agricultura protegida (AP), en invernaderos y casas sombra, es una industria presente en los 32 estados del país con una superficie de 42 515 ha, de las cuales 25 370 ha se siembran de hortalizas, siendo el pepino la segunda con mayor producción (SIAP, 2021).

El magnesio (Mg) es un nutrimento esencial para las plantas; sin embargo, su importancia en la producción agrícola es subestimada (Rosanoff, Weaver y Rude, 2012; Cakmak, 2013); la deficiencia de Mg es común en las hortalizas (Ruan, Ma y Yang, 2012), a pesar de ello, hay poca investigación sobre el efecto del Mg en la producción y calidad de las hortalizas (Cakmak y Yazici, 2010). Hauer-Jakli y Tränkner (2019) señalan que del año 2010 al 2018 se publicaron a nivel mundial 61 estudios relevantes sobre el Mg en la producción de plantas, de los cuales, algunos se realizaron en cultivos de tomate (Kashinath, Ganesha, Senthivel, James y Sadashiva, 2013), cebolla (*Allium cepa* L.) (Kleiber, Golez y Krzesiński, 2012), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) (Canizella, Moreira, Moraes y Fageria, 2015), sandía (*Citrullus lanatus* L.) (Huang *et al.*, 2016) y girasol (*Helianthus annuus* L.) (Rehman, Alharby, Alzahrani y Rady, 2018). En México, García *et al.*, (2015) publicaron que el Mg no afectó la producción de materia seca en órganos de *Lilium* spp. El nitrógeno (N) es el elemento más aplicado en los cultivos (Geary, Clark, Hopkins y Jolley, 2015); las grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados usados en el mundo alteran el ciclo biogeoquímico del N y provocan contaminación de NO_3^- en aguas, sistemas costeros (Steffen *et al.*, 2015) y cuencas hidrológicas (Ouyang *et al.*, 2019; Rojas-Rodríguez, Coronado, Rossetti, y Beltrán, 2020), por ello, es necesario optimizar la eficiencia en el uso (EU) del N (Zhang *et al.*, 2015; Abenavoli *et al.*, 2016; Du, Cao, Liu, Gu y Cao, 2017), de P y K (Nieves-Cordones, Rubio y Santa-Maria, 2020). Estimaciones indican que 45% al 55 % del N aportado a los suelos se pierde (Mahmud, Panday, Mergoum y Missaoui, 2021), por lo que es necesario reducir la aplicación de fertilizantes nitrogenados y seleccionar plantas con mejor EU de N

(Hirel, Le Gouis, Ney y Gallais, 2007). La absorción de N y su utilización por las plantas es afectada por el Mg debido a que este elemento participa en procesos de fotosíntesis, producción y distribución de asimilados (Cakmak y Kirkby, 2008; Grzebisz, 2013). Yousaf *et al.* (2021) reportaron que el crecimiento, rendimiento y los contenidos nutrimentales del rábano (*Raphanus sativus* L.) fueron afectados por diferentes tratamientos de N y Mg. Peng *et al.* (2020) mencionan que el Mg aumentó la absorción de N en soya (*Glycine max* L.), al promover la absorción de nitrato. Grzebisz (2013) revisó literatura sobre el Mg en la eficiencia de absorción de N (EAN) en cereales, maíz y remolacha desarrollados en suelo, y concluyó que el Mg ejerció un efecto positivo en la EAN cuando el suministro de N por el suelo, y por los fertilizantes, fue deficiente y el aporte de Mg fue alto. Se han hecho estudios sobre la EU de los nutrimentos en pepino (Tüzel, Irget, Güll, Tuncay y Eltez, 1999; Suojala, Salo, Pulkkinen y Tikanmäki, 2005; Singh, Singh y Singh, 2019) y tomate (Ojodeagua *et al.*, 2008; Abenavoli *et al.*, 2016; Du *et al.*, 2017).

Una alternativa para eficientar la EU de nutrimentos, es utilizar sistemas hidropónicos cerrados, donde la solución nutritiva (SN) se reutiliza y se reduce el uso de nutrimentos, sin afectar el rendimiento (Sánchez, González, Moreno, Pineda y Reyes, 2014; De la Rosa *et al.*, 2016). A nivel global, son escasas las investigaciones sobre el efecto conjunto del Mg y del N en las plantas, mientras que en México no se encontraron estudios sobre este tema. Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar tres relaciones Mg^{2+} /cationes (K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}), y tres relaciones NO_3^- /aniones (NO_3^- , H_2PO_4^- y SO_4^{2-}), sobre el crecimiento, composición mineral, eficiencia de uso de nutrimentos y el rendimiento de pepino en sistema hidropónico cerrado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en invernadero tipo multitúnel con ventila cenital fija y mallas antiáfidos en las paredes laterales, localizado en la Facultad de Agronomía en Culiacán, Sinaloa, México a $24^\circ 37' 29''$ N, $107^\circ 24' 30''$ O, y 38 m de altitud, con temperatura promedio de 19°C y humedad relativa media 67%. Semillas de pepino (*Cucumis sativus* cv. Poinsett 76) fueron sembradas en charolas de poliestireno de 128 cavidades con volumen individual de 35 cm^3 llenadas con turba *Sphagnum* parda (Kekkila Professional).

En los primeros siete días, los riegos aplicados fueron con agua destilada; una vez emergidas las plantas, y hasta 10 días posteriores, las plantas se regaron con la solución universal de Steiner diluida al 50% de su concentración normal. Posteriormente, y hasta el trasplante 30 días después de la siembra (dds) se regaron con la solución nutritiva (SN) al 100%. La SN se preparó con fertilizantes y agua destilada y se añadieron las concentraciones de micronutrientes (mg L^{-1}) siguientes: Fe 2, Mn 1.1, B 1.2, Cu 0.1, Zn 1.6 y Mo 0.04. Las plantas se trasplantaron a un sistema hidropónico en circuito cerrado, integrado por 108 recipientes de plástico con capacidad de 20 L cada uno, pintados de color negro; 54 recipientes contenían 15 L de turba como sustrato y los 54 restantes contenían 10 L de SN de los tratamientos correspondientes. El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial de tratamientos 3^2 y seis repeticiones, para un total de 54 unidades experimentales, donde cada unidad experimental consistió de una planta de pepino por cada recipiente con sustrato. Se aplicó riego diario a la turba y diariamente se repuso el agua evapotranspirada, mediante aforo con agua de riego, sin ajustar el pH de las SN, las cuales se renovaron cada 14 días hasta finalizar el trabajo. Los recipientes con sustrato se colocaron en bancas con altura de 50 cm y largo de 5 m; la separación entre bancas fue de 1.2 m; la distancia entre plantas en las bancas fue de 0.4 m. Los tratamientos estudiados fueron nueve SN provenientes de la combinación de tres relaciones (20/100, 40/100 y 60/100) porcentuales Mg^{2+} /cationes

(K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) y tres relaciones (40/100, 60/100 y 80/100) porcentuales NO_3^- /aniones (NO_3^- , H_2PO_4^- y SO_4^{2-}). Las SN se diseñaron a partir de modificaciones de la solución universal de Steiner (1984), y consistieron en variar la concentración de Mg^{2+} con respecto a K^+ y Ca^{2+} y la concentración de NO_3^- con relación a H_2PO_4^- y SO_4^{2-} . En el Cuadro 1 se presenta la composición química de las SN, una vez que fueron calculadas y ajustadas a un potencial osmótico de -0.072 MPa, de acuerdo a los lineamientos propuestos por Steiner (1984). Las SN se prepararon con agua de riego con CE de 0.3 dS m^{-1} y pH de 7, clasificada C1S1 (riesgo bajo de salinización y sodificación) (Ayers y Westcot, 1985), considerando en la formulación de las SN los nutrientes presentes en el agua. Como fuentes de nutrientes se usaron fertilizantes comerciales. Al final de la cosecha (108 dds), se cortaron las plantas de cada unidad experimental, se seccionaron en sus diferentes órganos y se secaron a 70°C hasta peso constante. El material seco se molió y se pasó por un tamiz de 0.5 mm de diámetro; para cuantificar la concentración nutricional en hojas, tallos y frutos, a los órganos vegetales se les realizó digestión seca a 500°C durante tres horas y el análisis de potasio, calcio y magnesio se hizo por absorción atómica (Motsara y Roy, 2008).

El N se determinó por el procedimiento semi-micro Kjeldhal modificado para incluir nitratos (Etchevers, 1987). Se realizaron siete cortes de frutos y en cada corte se registró el número, peso, largo y diámetro de los frutos. La eficiencia de uso de nutrientes se determinó mediante el cociente kg de nutriente aplicado/tonelada

Cuadro 1. Composición química de las soluciones nutritivas empleadas en la producción de pepino hidropónico.

Table 1. Chemical composition of nutrient solutions used in hydroponic cucumber production.

Relación	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NO_3^-	H_2PO_4^-	SO_4^{2-}
$\text{Mg}^{2+}/\text{NO}_3^-$	-----mol _c m ⁻³ -----					
20/40	7.43	9.56	4.25	8.50	1.59	11.15
20/60	7.00	9.00	4.00	12.00	1.00	7.00
20/80	6.61	8.50	3.78	15.12	0.47	3.31
40/40	5.75	7.40	8.77	8.77	1.64	11.51
40/60	5.41	6.95	8.24	12.36	1.03	7.21
40/80	5.10	6.56	7.77	15.55	0.49	3.40
60/40	3.96	5.09	13.58	9.06	1.70	11.89
60/60	3.72	4.78	12.74	12.74	1.06	7.43
60/80	3.50	4.50	12.00	16.00	0.50	3.50

de pepino producida. El análisis de los datos incluyó ANDEVA y comparación de medias ($P \leq 0.05$) para los factores principales y para su interacción, mediante el sistema computacional Statistical Analysis System versión 9.4 (SAS Institute, 2013). Se realizó un análisis de regresión lineal múltiple, con el programa Design Expert, versión 11 (StatEase, 2018), para generar los modelos, y predecir las concentraciones de N, Mg y K en hojas, y la eficiencia promedio en el uso de nutrimentos, en función de los niveles de los factores NO_3^- /aniones y Mg^{2+} /cationes en la SN.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración Nutricional en Órganos Vegetales

La interacción fue significativa para las combinaciones Mg y N en la SN y las concentraciones

de N y Mg en hojas de pepino (Cuadro 2). En contraste, hubo efecto principal del factor Mg en la concentración de K en hojas. La relación NO_3^- (40, 60 y 80/100) aumentó ($P \leq 0.05$) la concentración de N en hojas en las relaciones 20 Mg^{2+} y 60 Mg^{2+} ; los mayores valores de N (3.0 y 2.6%) se obtuvieron con 20/80 y 60/80 $\text{Mg}^{2+}/\text{NO}_3^-$, mientras que el menor valor (1.7% N) con 60/40 $\text{Mg}^{2+}/\text{NO}_3^-$. En general, las concentraciones de N en hojas fueron menores con la relación 40/100 NO_3^- , independientemente de la relación Mg^{2+} . Fageria (2001) indica que reducción del suministro de N afecta el crecimiento, consecuentemente la demanda por N se reduce, así como las concentraciones del N en las plantas. El aumento en la concentración de Mg en hojas debido a la relación Mg^{2+} de la SN, se presentó dentro de cada conjunto de tres SN con diferente relación NO_3^- (Cuadro 2); las mayores concentraciones de Mg se obtuvieron con 60/100 Mg^{2+} y las menores con

Cuadro 2. Efectos principales e interacciones de las relaciones NO_3^- /aniones y Mg^{2+} /cationes en la solución nutritiva y las concentraciones de N, K, Ca y Mg en hojas de pepino.

Table 2. Main effects and interactions of NO_3^- /anions and Mg^{2+} /cations ratios on the nutrient solution and N, K, Ca and Mg concentrations in cucumber leaves.

Factor	N	K	Ca	Mg
	----- % -----			
Relación porcentual de Mg^{2+} /cationes				
20/100	2.3 a	2.6 a	4.0 a	0.80 c
40/100	2.1 a	2.3 b	4.5 a	1.26 b
60/100	2.2 a	1.3 c	4.1 a	1.79 a
Relación porcentual de NO_3^- /aniones				
40/100	1.8 c	2.1 a	4.0 a	1.35 a
60/100	2.2 b	2.0 a	4.1 a	1.13 b
80/100	2.6 a	2.1 a	4.4 a	1.31 a
Mg^{2+} /cationes \times NO_3^- /aniones	**	NS	NS	*
20/100 \times 40/100	1.8 d	-	-	0.8 d
20/100 \times 60/100	2.1 bcd	-	-	0.7 d
20/100 \times 80/100	3.0 a	-	-	0.8 d
40/100 \times 40/100	1.9 cd	-	-	1.2 cd
40/100 \times 60/100	2.2 bcd	-	-	1.4 bc
40/100 \times 80/100	2.3 bc	-	-	1.2 cd
60/100 \times 40/100	1.7 d	-	-	2.0 a
60/100 \times 60/100	2.5 ab	-	-	1.5 bc
60/100 \times 80/100	2.6 ab	-	-	1.9 ab

Medias con letras iguales en cada columna y cada factor, son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$). NS = no significativo; * ($P \leq 0.05$), ** ($P \leq 0.01$). Means with the same letters in each column and each factor are statistically equal (Tukey $P \leq 0.05$). NS = not significant; * ($P \leq 0.05$), ** ($P \leq 0.01$).

20/100 Mg²⁺, atribuido a la mayor concentración de Mg en estas soluciones, lo que favoreció su absorción. Ruan *et al.*, (2012) reportaron que concentraciones de Mg en la SN aumentaron la concentración de este elemento en hojas de té (*Camellia sinensis* L.), girasol (*Helianthus annuum* L.) (Rao, Sharp y Boyer, 1987), haba (*Vicia faba* L.) (Neuhaus, Geilfuis y Mühlhing, 2014) y maíz (Jesek, Geilfus, Bayer y Mühlhing, 2015). Los modelos de regresión estimados para predecir las concentraciones de N y Mg en hojas, usando la codificación de los factores NO₃⁻ y Mg²⁺ (Cuadro 9) son: % N = 2.21 - 0.417 A₁ + 0.0278 A₂ + 0.05 B₁ - 0.078 B₂ - 0.089 A₁B₁ - 0.233 A₂B₁ + 0.222 A₁B₂ + 0.028 A₂B₂, con coeficiente de determinación (R²) igual a 0.706, que explica 70.6 % la variabilidad de los datos. Con base a este modelo, aumentos en la relación NO₃⁻ en la SN incrementaron la concentración de N en hojas; las interacciones A₁B₁, A₂B₁ redujeron dicha concentración y las combinaciones A₁B₂ y A₂B₂ la aumentaron. El modelo para Mg es: 1.28 + 0.064 A₁ - 0.094 A₂ - 0.484 B₁ - 0.020 B₂ - 0.043 A₁B₁ + 0.035 A₂B₁ - 0.136 A₁B₂ + 0.189 A₂B₂, y R² = 0.742; las combinaciones A₂B₂ y A₂B₁ aumentaron la concentración de Mg en hojas, respecto al valor promedio y A₁B₁ la redujo. Las concentraciones de K en las hojas fueron reducidas (P ≤ 0.05) con los aumentos de la relación Mg²⁺ en la SN (Cuadro 2), por el antagonismo del Mg con el K, que provocó aumento de Mg y reducción de K en hojas, lo que coincide con Fageria (2001), Kleiber *et al.* (2012) y Jesek *et al.*,

(2015), quienes reportaron dicho antagonismo en plantas de arroz, cebolla y maíz respectivamente, y difiere de Senbayram, Gransee, Wahle y Thiel (2015), los cuales, indican que concentraciones altas de Mg en la solución del suelo, no alteran la absorción de K por las plantas, debido al desarrollo de sistemas específicos de transporte de K, en las células. Xie, Cakmak, Wang, Zhang y Guo (2021) indican que el antagonismo del Mg sobre el K es menor que el de K sobre Mg, por ello es necesario usar un balance adecuado entre estos dos nutrientes, especialmente en especies de plantas con alta demanda de potasio.

El modelo de regresión para K en hojas = 2.07 + 0.51B₁ + 0.18B₂, con R² = 0.71 y CV = 16.3 %, donde se refleja que al aumentar de 20 a 40 y de 20 a 60 la relación Mg²⁺ la concentración de K se reduce 12.8 y 33.3%, por el antagonismo de Mg sobre K. Respecto a las concentraciones nutrimentales en tallos, los factores Mg²⁺ y NO₃⁻ fueron diferentes (P ≤ 0.05) para las concentraciones de N, K y Mg (Cuadro 3); las menores concentraciones de N y Mg se obtuvieron con la menor relación Mg²⁺/cationes (20/100), en contraste se obtuvo la mayor concentración de K; de forma similar, que en hojas, el antagonismo del Mg sobre K se presentó en los tallos, ya que al aumentar a 40 y 60% la relación Mg²⁺ en la SN, las concentraciones de K en fueron reducidas significativamente; las mayores concentraciones de N y Mg en tallos fueron obtenidas con 80/100, NO₃⁻/aniones, aunque esta relación redujo la concentración de K en los tallos; la concentración de Mg en los frutos

Cuadro 3. Efecto de los factores Mg²⁺/cationes y NO₃⁻/aniones en la solución nutritiva y las concentraciones de N, K, Ca y Mg en tallos de pepino.

Table 3. Effect of Mg²⁺/cations and NO₃⁻/anions factors on nutrient solution and N, K, Ca and Mg concentrations in cucumber stems.

Factor	N	K	Ca	Mg
Relación porcentual deMg ²⁺ /cationes				
20/100	1.6 b	4.0 a	1.1 a	0.34 b
40/100	1.7 ab	3.4 b	1.1 a	0.44 a
60/100	1.8 a	2.4 c	1.0 a	0.51 a
Relación porcentual deNO ₃ ⁻ /aniones				
40/100	1.3 c	3.3 b	1.1 a	0.45 a
60/100	1.7 b	3.9 a	1.1 a	0.37 b
80/100	2.1 a	3.0 b	1.0 a	0.47 a
Mg ²⁺ /cationes × NO ₃ ⁻ /aniones	NS	NS	NS	NS

Medias con letras iguales en cada columna y cada factor, son estadísticamente iguales (Tukey P ≤ 0.05). NS = no significativo. Means with the same letters in each column and each factor are statistically equal (Tukey P ≤ 0.05). NS = not significant.

fue alterada por la relación Mg^{2+} , mientras que la relación NO_3^- fue diferente para la concentración de N en dicho órgano; los mayores valores en frutos (0.26% Mg y 2.3% N) se obtuvieron con la relación 60% Mg^{2+} , y 80% NO_3^- , respectivamente (Cuadro 4).

Con la SN de 60/100 Mg^{2+} se obtuvo 0.26% Mg en frutos, equivalente a 2600 mg kg^{-1} de pepino seco; en el presente trabajo el peso medio de fruto fresco fue de 313 g con 5 % de materia seca, y aporte potencial de 40 mg de Mg por pepino, por lo que aumentar el contenido de Mg en los pepinos, contribuye a mejorar la calidad nutricional, ya que a nivel global la deficiencia de Mg en las personas es común, por ejemplo, dos terceras partes de adultos evaluados en Estados Unidos e Inglaterra consumen menos de los requerimientos diarios de Mg (420 mg $día^{-1}$ para hombres y 320 mg $día^{-1}$ para mujeres) (IOM, 1997; Rosanoff *et al.*, 2012).

Eficiencia en el Uso de Nutrimientos

La interacción de la relación porcentual de $Mg^{2+}/cationes \times$ relación porcentual de $NO_3^-/aniones$ fue significativa para las eficiencias de N, Mg, K, Ca, S y P (Cuadro 5), las mayores eficiencias de N en las tres relaciones Mg^{2+} (20, 40 y 60/100) se obtuvieron con 40 (2.8, 2.8 y 4.0) y 60 NO_3^- (2.8, 4.4 y 4.4) y las menores con 80 NO_3^- (4.5, 6.2 y 5.9) (Cuadro 5), lo cual coincide parcialmente con Min, Zhao, Shi, Xing y Zhu (2011) y Du *et al.* (2017) quienes reportaron menor eficiencia de N a medida que aumenta la cantidad de N

aportada, aunque ellos no evaluaron la interacción de N con Mg; de forma similar, las eficiencias menores de Mg (5.0, 3.6 y 3.7 $kg\ Mg^{-1}$) se obtuvieron con 60/100 Mg^{2+} en cada conjunto de las relaciones NO_3^- (40, 60 y 80/100) y las mayores eficiencias (1.0, 0.7 y 0.8) con 20/100 Mg^{2+} combinadas con 40 NO_3^- , 60 NO_3^- y 80 NO_3^- ; con la combinación 20/100 Mg^{2+} y 60/100 NO_3^- se obtuvo la mayor eficiencia de K (4.3) y la menor (6.5) con 40/100 NO_3^- ; (Cuadro 5); las eficiencias mayores de Ca (2.4, 1.7 y 1.7 $kg\ Mg^{-1}$) fueron obtenidas con 60/100 Mg^{2+} combinadas con (40, 60 y 80/100) NO_3^- , lo cual puede atribuirse a que en la formulación química de estas combinaciones, las concentraciones de Ca son menores, ya que alta relación de Mg (60/100) en la SN, implica menor concentración de Ca, respecto al Mg (Steiner, 1984); las mayores eficiencias de S (1.0, 1.4 y 1.3 $kg\ Mg^{-1}$) y P (0.3, 0.4 y 0.4 $kg\ Mg^{-1}$) (Cuadro 5) fueron obtenidas con 80 NO_3^- , dentro de cada relación Mg^{2+} (20, 40 y 60/100), debido a que alta relación de NO_3^- requiere reducir los porcentajes de P y SO_4^{2-} en la SN (Steiner, 1984). Singh *et al.* (2019) reportaron las siguientes eficiencias para pepino cultivado en sustrato e invernadero S>P>Mg>N>Ca>K. Grewal, Maheshwari y Parks (2011) mencionan eficiencias, en orden decreciente, Mg>P>Ca>N>K para pepino hidropónico. En el presente estudio, las eficiencias promedio fueron P>Mg>S=Ca>N>K. Con base a datos reportados por Sánchez *et al.* (2014) en pepino, la eficiencia promedio obtenida para N, P y K fue 7.9, 1.7 y 10.1 $kg\ Mg^{-1}$ de

Cuadro 4. Efectos de los factores $Mg^{2+}/cationes$ y $NO_3^-/aniones$ en la solución nutritiva y las concentraciones de N, K, Ca y Mg en frutos de pepino.

Table 4. Effects of factors $Mg^{2+}/cations$ and $NO_3^-/anions$ on the nutrient solution and the concentrations of N, K, Ca and Mg cucumber fruits.

Factor	N	K	Ca	Mg
Relación porcentual de $Mg^{2+}/cationes$				
20/100	2.1 a	2.91 a	0.14 a	0.11 b
40/100	2.1 a	2.73 a	0.15 a	0.19 ab
60/100	2.3 a	2.95 a	0.17 a	0.26 a
Relación porcentual de $NO_3^-/aniones$				
40/100	2.0 b	2.9 a	0.18 a	0.20 a
60/100	2.2 ab	2.9 a	0.12 a	0.15 a
80/100	2.3 a	2.9 a	0.17 a	0.22 a
$Mg^{2+}/cationes \times NO_3^-/aniones$	NS	NS	NS	NS

Medias con letras iguales en cada columna y cada factor, son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$). NS = no significativo.

Means with the same letters in each column and each factor are statistically equal (Tukey $P \leq 0.05$). NS = not significant.

Cuadro 5. Efectos principales e interacciones de las relaciones Mg²⁺/cationes y NO₃⁻/aniones en la solución nutritiva y las eficiencias (kg nutrimento Mg⁻¹ pepino) de N, Mg, S, K, Ca y P.**Table 5. Main effects and interactions of Mg²⁺/cations and NO₃⁻/anions ratios on the nutrient solution and efficiencies (kg nutrient Mg⁻¹ cucumber) of N, Mg, S, K, Ca and P.**

Factor	N	Mg	S	K	Ca	P
----- kg Mg ⁻¹ pepino -----						
Relación porcentual deMg ²⁺ /cationes						
20/100	3.3 b	0.8 c	2.2 b	5.3 a	3.1 a	0.6 b
40/100	4.5 a	2.4 b	2.7 b	5.1 a	2.9 a	0.8 b
60/100	4.8 a	4.1 a	3.3 a	3.7 b	1.9 b	0.9 a
Relación porcentual deNO ₃ ⁻ /aniones						
40/100	3.2 c	2.8 a	4.6 a	5.3 a	3.0 a	1.3 a
60/100	3.9 b	2.2 b	2.4 b	4.2 b	2.4 b	0.7 b
80/100	5.5 a	2.3 ab	1.2 c	4.6 ab	2.6 b	0.4 c
Mg ²⁺ /cationes × NO ₃ ⁻ /aniones						
	*	**	**	**	**	**
20/100 × 40/100	2.8 d	1.0 d	4.9 bc	6.5 a	3.9 a	1.1 bc
20/100 × 60/100	2.8 d	0.7 d	1.7 de	4.3 bc	2.5 bc	0.5 de
20/100 × 80/100	4.5 bc	0.8 d	1.0 e	5.2 ab	3.0 ab	0.3 e
40/100 × 40/100	2.8 d	2.3 c	4.0 b	4.9 abc	2.8 b	1.2 b
40/100 × 60/100	4.4 c	2.4 c	2.8 d	5.1 ab	2.9 b	0.8 cd
40/100 × 80/100	6.2 a	2.5 c	1.4 e	5.3 ab	3.0 ab	0.4 e
60/100 × 40/100	4.0 cd	5.0 a	5.8 a	4.5 bc	2.4 bc	1.6 a
60/100 × 60/100	4.4 c	3.6 b	2.8 cd	3.3 c	1.7 c	0.8 cd
60/100 × 80/100	5.9 ab	3.7 b	1.3 e	3.3 c	1.7 c	0.4 e

Medias con letras iguales en cada columna y cada factor, son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$). * ($P \leq 0.05$), ** ($P \leq 0.01$).Means with equal letters in each column and each factor are statistically equal (Tukey $P \leq 0.05$). * ($P \leq 0.05$), ** ($P \leq 0.01$).

fruto, respectivamente. Suojala *et al.* (2005) reportaron absorción de 1.2-1.4 kg N, 0.28-0.35 kg P y 2.2 kg K por tonelada de pepino. Alejo-Santiago *et al.* (2021) indican un requerimiento nutrimental de N 3.93, P 0.46, K 3.11, Ca 0.79 y Mg 1.3 kg Mg⁻¹ de pepino persa cv. Reehan; mientras que en cv. Khassib fue N 5.87, P 0.49, K 3.11, Ca 0.85 y Mg 1.54 kg Mg⁻¹. En el Cuadro 6 se indican los modelos de regresión lineal múltiple de las eficiencias de los nutrimentos (kg Mg⁻¹) de pepino, los cuales permiten predecir las eficiencias para cada uno de los nutrimentos, considerando los datos del Cuadro 9.

Extracción Nutrimental

La relación NO₃⁻ afectó ($P \leq 0.05$) las extracciones nutrimentales de N, K, Ca y Mg, mientras que la relación Mg²⁺ fue diferente para N, K y Mg, igualmente

la interacción NO₃⁻ × Mg²⁺ modificó estadísticamente la extracción de Mg (Cuadro 7); las SN con relaciones 60 NO₃⁻ y 20 Mg²⁺ presentaron las mayores extracciones, excepto el Mg, lo cual fue reflejo del mayor rendimiento de pepino obtenido con estos tratamientos; la relación Mg²⁺, aumentó la extracción de Mg por las plantas, en las relaciones 40 y 80/100 NO₃⁻, donde las mayores extracciones de Mg (33.2 kg ha⁻¹ y 32.7 kg ha⁻¹) se obtuvieron con 60/40 y 60/80 Mg²⁺/NO₃⁻, atribuida a la mayor proporción de Mg en la SN, y las menores (14.2 kg Mg ha⁻¹ y 16.8 kg Mg ha⁻¹) con 20/40 y 20/80 Mg²⁺/NO₃⁻ (Figura 1). La extracción de los nutrimentos en orden decreciente fue: K > N > Ca > Mg; este patrón de extracción coincide con Vargas, Castillo, Pineda, Ramírez y Avitia (2014) en tomate, Azofeifa y Moreira (2008) en chile jalapeño, y es parecido (N > K > Ca > Mg) a lo reportado en chile de agua (*Capsicum annuum* L.) por Valentín, Castro, Rodríguez

Cuadro 6. Modelos de regresión lineal múltiple para las eficiencias de los nutrimentos (kg Mg⁻¹) de pepino.
Table 6. Multiple linear regression models for nutrient efficiencies (kg Mg⁻¹) of cucumber.

Nutrimento	CV	R ²	Modelo
N	18.6	0.74	$N = 4.19 - 1.01A_1 - 0.324A_2 - 0.852B_1 + 0.270B_2 + 0.418A_1B_1 - 0.226A_2B_1 - 0.670A_1B_2 + 0.268A_2B_2$
Mg	23.7	0.87	$Mg = 2.44 + 0.320A_1 - 0.207A_2 - 1.59B_1 - 0.074B_2 - 0.148A_1B_1 + 0.063A_2B_1 - 0.431A_1B_2 + 0.196A_2B_2$
S	23.4	0.87	$S = 2.74 + 1.86A_1 - 0.324A_2 - 0.519B_1 - 0.030B_2 - 0.115A_1B_1 - 0.165A_2B_1 - 0.537A_1B_2 + 0.363A_2B_2$
K	18.6	0.58	$K = 4.7 + 0.582A_1 - 0.478A_2 + 0.615B_1 + 0.387B_2 + 0.557A_1B_1 - 0.515A_2B_1 - 0.798A_1B_2 + 0.446A_2B_2$
Ca	18.9	0.66	$Ca = 2.65 + 0.361A_1 - 0.278B_2 + 0.483B_1 + 0.228B_2 + 0.356A_1B_1 - 0.322A_2B_1 - 0.456A_1B_2 + 0.267A_2B_2$
P	22.9	0.87	$P = 0.783 + 0.511A_1 - 0.094A_2 - 0.144B_1 - 0.006B_2 - 0.033A_1B_1 - 0.044A_2B_1 - 0.139A_1B_2 + 0.100A_2B_2$

ya Pérez (2013). En términos generales, la extracción de nutrimentos por las plantas está relacionada con la producción de materia seca (MS), de tal manera que a mayor producción de MS más extracción de nutrimentos.

Rendimiento y sus Componentes

El número de frutos (NF) y el rendimiento de frutos (RF) presentaron diferencias por la interacción de los factores Mg²⁺ y NO₃⁻ (Cuadro 8); los mayores valores de ambas variables (17.3 NF y 115.1 Mg frutos ha⁻¹) se obtuvieron con la combinación 20/100 Mg²⁺ y 60/100 NO₃⁻ y los menores (12.8 NF y 83.9 Mg frutos ha⁻¹)

con 20/100 Mg²⁺ y 40/100 NO₃⁻; debido a que el peso medio de frutos (PMF) no fue afectado por los factores en estudio, ni por la interacción (Cuadro 8), las diferencias en el rendimiento fueron determinadas por el NF. En el presente estudio, las SN tienen similar potencial osmótico y diferentes proporciones relativas de cationes y aniones, por lo que al tener la misma concentración iónica total (30 mg ión L⁻¹), la respuesta de las plantas a las SN depende de las proporciones de los componentes, por ello, alta proporción de Mg²⁺ (40 y 60/100) combinadas con baja (40/100) o alta (80/100) relación NO₃⁻ redujeron los valores del NF y RF, comparados con 20/100 Mg²⁺ y 60/100 NO₃⁻. Steiner (1980), reporta que una relación extrema de

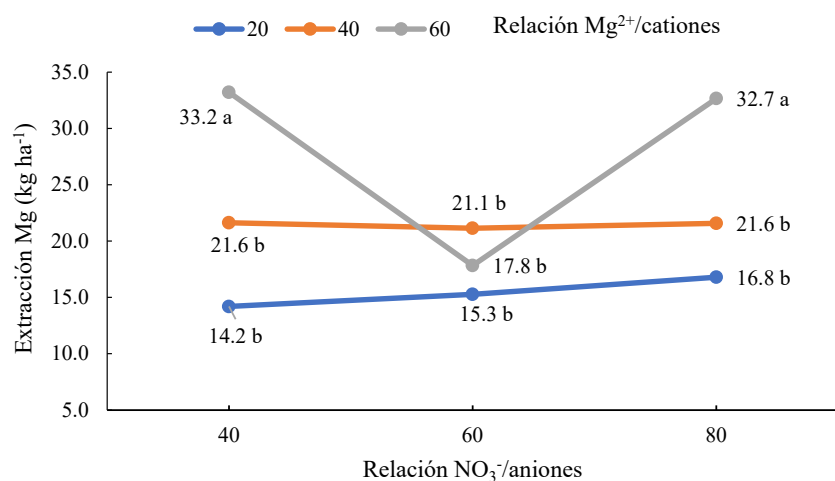


Figura 1. Interacción Mg²⁺/cationes y NO₃⁻/aniones en la solución nutritiva y la extracción de Mg por plantas de pepino. Medias con distinta literal en cada columna y en cada línea son diferentes. Tukey (P ≤ 0.05).

Figure 1. Mg²⁺/cations and NO₃⁻/anions interaction in nutrient solution and Mg extraction by cucumber plants. Means with different literals in each column and in each line are different. Tukey (P ≤ 0.05).

Cuadro 7. Extracción de nutrientes (kg ha⁻¹) de plantas de pepino en sistema hidropónico cerrado.**Table 7. Nutrient extraction (kg ha⁻¹) of cucumber plants in a closed hydroponics system.**

Factor	Relación porcentual	N	K	Mg	Ca
NO ₃ ⁻ /aniones	40/100	89.1 b	129.6 ab	23.0 a	54.9 b
	60/100	107.6 a	146.5 a	18.1 b	58.1 ab
	80/100	102.6 ab	114.8 b	23.7 a	65.3 a
Mg ²⁺ /cationes	20/100	112.7 a	160.4 a	15.4 c	57.8 a
	40/100	91.0 b	118.5 b	21.5 b	63.6 a
	60/100	95.6 b	112.1 b	27.9 a	57.0 a
NO ₃ ⁻ /aniones × Mg ²⁺ /cationes		NS	NS	**	NS

Medias con letras iguales en cada columna y cada factor, son estadísticamente iguales (Tukey; $P \leq 0.05$). NS = no significativo.

Means with the same letters in each column and each factor are statistically equal (Tukey; $P \leq 0.05$). NS = not significant.

Cuadro 8. Efectos principales e interacciones de las relaciones Mg²⁺/cationes y NO₃⁻/aniones en la solución nutritiva y el número de frutos (NF), diámetro de frutos (DF), largo de frutos (LF), peso medio de frutos (PMF) y el rendimiento de frutos (RF).**Table 8. Main and interaction effects of Mg²⁺/cations and NO₃⁻/anions ratios on nutrient solution and number of fruits (NF), fruit diameter (DF), fruit length (LF), mean fruit weight (PMF) and fruit yield (RF).**

Factor	NF	DF	LF	PMF	RF
		cm	cm	g	Mg ha ⁻¹
Relación porcentual de Mg ²⁺ /cationes					
20/100	14.6 a	5.0 a	21.7 a	318.6 a	96.8 a
40/100	11.7 b	4.9 a	21.6 a	311.2 a	75.5 b
60/100	11.1 b	4.9 a	21.3 a	308.6 a	71.4 b
Relación porcentual de NO ₃ ⁻ /aniones					
40/100	11.7 c	4.9 a	21.3 a	313.8 a	76.4 b
60/100	13.9 a	4.9 a	21.4 a	312.2 a	90.5 a
80/100	11.8 b	4.9 a	21.9 a	312.4 a	76.8 b
Mg ²⁺ /cationes × NO ₃ ⁻ /aniones					
20/100 × 40/100	**	NS	NS	NS	**
20/100 × 60/100	12.8 bc	-	-	-	83.9 bc
20/100 × 80/100	17.3 a	-	-	-	115.1 a
40/100 × 40/100	13.7 ab	-	-	-	91.4 ab
40/100 × 60/100	12.8 bc	-	-	-	83.5 bc
40/100 × 80/100	11.8 bc	-	-	-	76.7 bc
60/100 × 40/100	10.3 bc	-	-	-	66.3 bc
60/100 × 60/100	9.5 c	-	-	-	61.8 c
60/100 × 80/100	12.5 bc	-	-	-	79.8 bc
60/100 × 80/100	11.3 bc	-	-	-	72.7 bc

Medias con letras iguales en cada columna y cada factor, son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$). ** ($P \leq 0.01$); NS = no significativo.

Means with the same letters in each column and each factor are statistically equal (Tukey $P \leq 0.05$). ** ($P \leq 0.01$); NS = not significant.

Mg²⁺ (64/100) redujo 13% la producción de lechuga y menciona que en SN con diversas relaciones mutuas entre los aniones NO₃⁻:H₂PO₄⁻:SO₄²⁻ y los cationes K⁺: Ca²⁺: Mg²⁺, las plantas crecen sin limitantes nutricionales, ya que tienen la capacidad de seleccionar los iones, en una determinada relación mutua, y aún con relaciones extremas, habrá poco efecto en la producción. Sin embargo, en el presente estudio los rendimientos obtenidos con 20/100 Mg²⁺ y 40/100 NO₃⁻ u 80/100 NO₃⁻ fueron 27 % y 20.6 % menores, respecto a 20/100 Mg²⁺ y 60/100 NO₃⁻, lo que indicaría que esta solución nutritiva tiene balance adecuado en sus iones para cubrir los requerimientos de las plantas. Wang *et al.* (2020) reportan que la aplicación de Mg a cultivos producidos en suelos, aumentó 8.5 % en promedio el rendimiento, comparado con la no aplicación de este elemento, aunque en suelos con contenidos de Mg intercambiable intermedio y alto no hubo diferencias. Los modelos de regresión para las variables NF y rendimiento, con los factores NO₃⁻/aniones y Mg²⁺/cationes codificados (Cuadro 9) son: NF = 12.46 - 0.740A₁ + 1.43A₂ + 2.15B₁ - 0.796B₂ - 1.04A₁B₁ + 1.30A₂B₁ + 1.91A₁B₂ - 1.26A₂B₂, con R²=0.549, que explica el 54.9% de la variabilidad del NF, mientras que el modelo para rendimiento (Mg ha⁻¹) = 81.24 - 4.83A₁ + 9.27A₂ + 15.53B₁ - 5.73B₂ - 8.04A₁B₁ + 9.02A₂B₁ + 12.85A₁B₂ - 8.09A₂B₂, y R²=0.57. De acuerdo al modelo para NF las combinaciones A₂B₁ y A₁B₂ fueron positivas debido a que aumentaron el NF comparado con el promedio de los efectos individuales, en cambio para A₂B₂ la interacción fue negativa; mientras que para el modelo de

Cuadro 9. Codificación de los tratamientos para predecir la respuesta para niveles dados de cada factor.

Table 9. Treatment coding to predict response for given levels of each factor.

Relación Mg ²⁺ /NO ₃ ⁻	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂
20/40	1	0	1	0
20/60	0	1	1	0
20/80	-1	-1	1	0
40/40	1	0	0	1
40/60	0	1	0	1
40/80	-1	-1	0	1
60/40	1	0	-1	-1
60/60	0	1	-1	-1
60/80	-1	-1	-1	-1

rendimiento, las relaciones 60/100 NO₃⁻ y 20/100 Mg²⁺ tienen el mayor efecto principal sobre esta variable, y las combinaciones 60/100 NO₃⁻ × 20/100 Mg²⁺, y 40/100 NO₃⁻ × 40/100 Mg²⁺, interactúan en sinergia al aumentar el rendimiento, comparado al rendimiento individual; en contraste, las combinaciones 40/100 NO₃⁻ y 20/100 Mg²⁺, y 60/100 NO₃⁻ y 40/100 Mg²⁺ fueron antagonistas al reducir el rendimiento. El rendimiento predicho para cada tratamiento puede ser estimado sustituyendo en el modelo la codificación respectiva dada en el (Cuadro 9).

CONCLUSIONES

La interacción de los factores relación Mg²⁺ y NO₃⁻ en la solución nutritiva afectó ($P \leq 0.05$) el número de frutos, el rendimiento de pepino, y las eficiencias en el uso de N, Mg y K. Los mayores valores de estas variables se obtuvieron con la combinación 20/100 Mg²⁺ y 60/100 NO₃⁻; la aplicación de relaciones superiores provocó baja eficiencia de N, P y K e inferiores rendimientos. Por ello, es necesario suministrar a las plantas soluciones nutritivas balanceadas y considerar en la formulación las relaciones, proporciones y concentraciones de los iones.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización y diseño: S. P. T. Datos de laboratorio: A. A. C. Análisis de datos: S. P. T. Escritura, revisión y edición: S. P. T. Control de plagas y enfermedades: C. F. L. R. Labores culturales: J. E. R. M.

AGRADECIMIENTOS

A la facultad de agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

LITERATURA CITADA

- Abenavoli, M. R., Longo, C., Lupini, A., Miller, A. J., Araniti, F., Mercati, F., ... Sunseri, F. (2016). Phenotyping two tomato genotypes with different nitrogen use efficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 107, 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.04.021>
- Alejo-Santiago, G., Becerra-Venegas, S. G., Bugarín-Montoya, R., Aburto-González, C. A., Quiñones-Aguilar, E. E., Rincón-Enriquez, G., & Juárez-Rosete, C. R. (2021). Requerimiento nutrimental y nutrición potásica en pepino persa con poda a un solo tallo. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-10. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.906>
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture*. Food and Agriculture Organization. *FAO Irrigation and Drainage Paper 29* (107 pp.). Rome, Italy: FAO
- Azofeifa, A., & Moreira, A. M. (2008). Absorción y distribución de nutrimentos en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annum* L. cv. Hot) en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 19-29.
- Cakmak, I., & Kirkby, E. A. (2008). Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiologia Plantarum*, 133(4), 692-704. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.01042.x>
- Cakmak, I., & Yazici, A. M. (2010). Magnesium: A Forgotten Element in Crop Production. *Better Crops*, 94(2), 23-25.
- Cakmak, I. (2013). Magnesium in crop production, food quality and human health. *Plant and Soil*, 368(1), 1-4.
- Canizella, B. T., Moreira, A., Moraes, L. A. C., & Fageria, N. K. (2015). Efficiency of magnesium use by common bean varieties regarding yield, physiological components, and nutritional status of plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46(11), 1376-1390. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1043452>
- De la Rosa-Rodríguez, R., Lara-Herrera, A., Lozano-Gutiérrez, J., Padilla-Bernal, L. E., Avelar-Mejía, J. J., & Castañeda-Miranda, R. (2016). Rendimiento y calidad de tomate en sistemas hidropónicos abierto y cerrado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 17, 3439-3452.
- Du, Y., Cao, H., Liu, S., Gu, X., & Cao, Y. (2017). Response of yield, quality, water and nitrogen use efficiency of tomato to different levels of water and nitrogen under drip irrigation in Northwestern. *China Journal of Integrative Agriculture*, 16(5), 1153-1161. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61371-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61371-0)
- Etchevers, J. D. (1987). Determinación de nitrógeno en suelos. In: S. A. Aguilar, J. D. Etchevers, & R. J. Z. Castellanos (Eds.). *Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo* (pp. 45-83). Chapingo, Estado de México, México: SMCS
- Fageria, V. D. (2001). Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, 24(8), 1269-1290. <https://doi.org/10.1081/PLN-100106981>
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization Statistical Database). (2017). *Producción mundial de pepino y área cosechada*. Consultado el 30 de mayo, 2021, desde <http://faostat.fao.org>
- García-Avila, C. J., Castillo-González, A. M., Avitia-García, E., Colinas-León, M. T., Trejo-Téllez, L. I., & Vargas-Madriz, H. (2015). Magnesio y su relación con la calidad de *Lilium* cv. Casablanca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(2), 265-276. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i2.687>
- Geary, B., Clark, J., Hopkins, B. G., & Jolley, V. D. (2015). Deficient, adequate and excess nitrogen levels established in hydroponics for biotic and abiotic stress-interaction studies in potato. *Journal of Plant Nutrition*, 38(1), 41-50. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.912323>
- Grewal, H. S., Maheshwari, B., & Parks, S. E. (2011). Water and nutrient use efficiency of a low-cost hydroponic greenhouse for a cucumber crop: An Australian case study. *Agricultural Water Management*, 98(5), 841-846. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.010>
- Grzebisz, W. (2013). Crop response to magnesium fertilization as affected by nitrogen supply. *Plant and Soil*, 368, 23-39. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1574-z>
- Hauer-Jákli, M., & Tränkner, M. (2019). Critical leaf magnesium thresholds and the impact of magnesium on plant growth and photo-oxidative defense: A systematic review and meta-analysis from 70 years of research. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00766>
- Hirel, B., Le Gouis, J., Ney, B., & Gallais, A. (2007). The challenge of improving nitrogen use efficiency in crops plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. *Journal of Experimental Botany*, 58(9), 2369-2387. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm097>
- Huang, Y., Jiao, Y., Nawaz, M. A., Chen, Ch., Liu, L., Lu, Z., ... Bie, Z. (2016). Improving magnesium uptake, photosynthesis and antioxidant enzyme activities of watermelon by grafting onto pumpkin rootstock under low magnesium. *Plant and Soil*, 409, 229-246. <http://doi.org/10.1007/s11104-016-2965-3>
- IOM (Institute of Medicine). (1997). *Dietary Reference Intakes for Calcium, Phosphorus, Magnesium, Vitamin D and Fluoride*. Washington, DC, USA: National Academic Press. ISBN-10: 0-309-06350-7
- Jesek, M., Geilfus, C. M., Bayer, A., & Mühlhng, K. H. (2015). Photosynthetic capacity, nutrient status, and growth of maize (*Zea mays* L.) upon MgSO₄ leaf-application. *Frontiers in Plant Science*, 5, 1-10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00781>
- Khasinath, B. L., Ganesha-Murthy, A. N., Senthivel, T., James-Pitchai, G., & Sadashiva, A. T. (2013). Effect of applied magnesium on yield and quality of tomato in Alfisols of Karnataka. *Journal of Horticultural Sciences*, 8(1), 55-59.
- Kleiber, T., Golez, A., & Krzesiński, W. (2012). Effect of magnesium nutrition of onion (*Allium cepa* L.). Part I. Yielding and nutrient status. *Ecological Chemistry and Engineering*, 19(1), 97-105. <https://doi.org/10.2478/v10216-011-0010-2>

- Mahmud, K., Panday, D., Mergoum, A., & Missaoui, A. (2021). Nitrogen losses and potential mitigation strategies for a sustainable agroecosystem. *Sustainability*, 13(4), 2-23. <https://doi.org/10.3390/su13042400>
- Min, J., Zhao, X., Shi, W., Xing, G. X., & Zhu, Z. (2011). Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in southeastern China. *Pedosphere*, 21(4), 464-472. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60148-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60148-3)
- Motsara M. R., & Roy, R. N. (2008). *Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 19*. Rome, Italy: FAO
- Neuhaus, C., Geilfuis, C. M., & Mühling, K. H. (2014). Increasing root and leaf growth and yield in Mg-deficient faba beans (*Vicia faba* L.) by MgSO₄ foliar fertilization. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(5), 741-747. <https://doi.org/10.1002/jpln.201300127>
- Nieves-Cordones, M., Rubio, F., & Santa-Maria, G. E. (2020). Editorial: Nutrient use efficiency in plants: An integrative approach. *Frontier in Plant Science*, 11, 623976. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.623976>
- Ojodeagua-Arredondo, J. L., Castellanos-Ramos, J. Z., Muñoz-Ramos, J. J., Alcántar-González G., Tijerina-Chávez, L., Vargas-Tapia, P., & Enríquez-Reyes, S. (2008). Eficiencia de suelo y tezontle en sistemas de producción de tomate en invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(4), 367-374. <https://doi.org/10.35196/rfm.2008.4.367>
- Ouyang, W., Hao, X., Wang, L., Xu, Y., Tysklind, M., Gao, X., & Lin, C. (2019). Watershed diffuse pollution dynamics and response to land use and development assessment with riverine sediments. *Science of The Total Environment*, 659, 283-292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.367>
- Peng, W. T., Qi, W. L., Nie, M. M., Xiao, Y. B., Liao, H., & Chen, Z. C. (2020). Magnesium supports nitrogen uptake through regulating NRT2.1/2.2 in soybean. *Plant and Soil*, 457, 97-111. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04157-z>
- Rao, I. M., Sharp, R. E., & Boyer, J. S. (1987). Leaf magnesium alters photosynthetic response to low water potentials in sunflower. *Plant Physiology*, 84(4), 1214-1219. <https://dx.doi.org/10.1104%2Fpp.84.4.1214>
- Rehman, H. U., Alharby, H. F., Alzahrani, Y., & Rady, M. M. (2018). Magnesium and organic biostimulant integrative application induces physiological and biochemical changes in sunflower plants and its harvested progeny on sandy soil. *Plant Physiology and Biochemistry*, 126, 97-105. <http://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.02.031>
- Rojas-Rodríguez, I. S., Coronado-García, M. A., Rossetti-López, S. R., & Beltrán-Morales, F. A. (2020). Contaminación por nitratos y fosfatos provenientes de la actividad agrícola en la cuenca baja del río Mayo en el estado de Sonora, México. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 247-256. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.642>
- Rosanoff, A., Weaver, C. M., & Rude, R. K. (2012). Suboptimal magnesium status in the United States: are the health consequences underestimate. *Nutrition Reviews*, 70(3), 153-164. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2011.00465.x>
- Ruan, J., Ma, L., & Yang, Y. (2012). Magnesium nutrition on accumulation and transport of amino acid in tea plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(7), 1375-1383. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4709>
- Sánchez-del Castillo, F., González-Molina, L., Moreno-Pérez, E. C., Pineda-Pineda, J., & Reyes-González, C. E. (2014). Dinámica nutricional y rendimiento de pepino cultivado en hidroponía con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37, 261-269.
- SAS Institute. (2013). *Statistical Analysis System SAS/STAT User's Guide. version 9.4*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Senbayram, M., Gransee, A., Wahle, V., & Thiel, H. (2015). Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant-soil continuum. *Crop & Pasture Science*, 66(12), 1219-1229. <http://dx.doi.org/10.1071/CP15104>
- Shaul, O., Hilgermann, D. W., De Almeida-Engler, J., Van Montagu, M., Inzé, D., & Galili, G. (1999). Cloning and characterization of a novel Mg²⁺/H⁺ exchanger. *The EMBO Journal*, 18(14), 3973-3980. <http://doi.org/10.1093/emboj/18.14.3973>
- SIAP (Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera). (2021). *Estadística básica*. Consultado el 23 de agosto, 2021, desde <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Singh, M. C., Singh, K. G., & Singh, J. P. (2019). Nutrient and water use efficiency of cucumber grown in soilless media under a naturally ventilated greenhouse. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21(1), 193-207.
- StatEase (2018). *Design Expert Software Use's Guide version 11*. Minneapolis, MN, USA: StatEase.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockstorm, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... Sorlin, S. (2015). Planet boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1-11. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Steiner, A. A. (1980). The selective capacity of plants for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. *Acta Horticulturae*, 89, 87-98. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1980.98.7>
- Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. *Proceedings 6th. International Congress in Soilless Culture* (pp. 633-649). Lunteren, Netherlands: ISOSC.
- Suojala-Ahlfors, T. A., Salo, T., Pulkkinen, J., & Tikanmäki, E. (2005). Nutrient demand and uptake by pickling cucumber under drip irrigation in a northern climate. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 80(4), 498-502. <https://doi.org/10.1080/14620316.2005.11511967>
- Tüzel, I. H., Irget, M. E., Gül, A., Tuncay, Ö., & Eltez, R. Z. (1999). Soilless culture of cucumber in glasshouse: II. A comparison of open and closed systems on water and nutrient consumption. *Acta Horticulturae*, 491, 395-400. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1999.491.61>
- Valentín-Miguel, M. C., Castro-Brindis, R., Rodríguez-Pérez, J. E., Pérez-Grajales, M. (2013). Extracción de macronutrientes en chile de agua (*Capsicum annum* L.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 19(4), 71-78.
- Vargas-Canales, J. M., Castillo-González, A. M., Pineda-Pineda, J., Ramírez-Arias, J. A., & Avitia-García, E. (2014). Extracción nutricional de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20(1), 71-88. <https://doi.org/10.5154/r.chsh.2013.02.005>
- Wang, Z., Hassan, M., Nadeem, F., Wu, L., Zhang, F., & Li, X. (2020). Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: A meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1727.

-
-
- Xie, K., Cakmak, I., Wang, S., Zhang, F., & Guo, S. (2021). Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in plants. *The Crop Journal*, 9, 249-256. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.10.005>
- Yousaf, M., Bashir, S., Raza, H., Shah, A. N., Iqbal, J., Arif, M., ... Hu, Ch. (2021). Role of nitrogen and magnesium for growth, yield and nutritional quality of radish. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(5), 3021-3030. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.02.043>
- Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., & Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528, 51-59. <https://doi.org/10.1038/nature15743>