

La Humedad Relativa y Concentración de la Solución Nutritiva Afectan el Rendimiento, Calidad y Estado Nutrimental en Pepino (*Cucumis sativus* L.) Relative Humidity and Nutrient Solution Concentration Affect Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Yield, Quality and Nutrient Status

Luis Alonso Valdez-Aguilar¹ , Esau Hernández-Velázquez¹ , Rodimiro Hernández-García² ,
Pedro Pérez-Rodríguez³ y Daniela Alvarado-Camarillo^{3†}

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura, ² Departamento de Fitotecnia, ³ Departamento de Ciencias del Suelo. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista. 25315 Saltillo, Coahuila, México. (L.A.V.A.) (E. H.V.), (R.H.G.), (P.P.R.), (D.A.C.).
† Autora para correspondencia: daniela.alvaradoc@uaan.edu.mx

RESUMEN

La mayoría de los productores de pepino en invernaderos de baja tecnología no presta atención al efecto de la humedad del aire sobre sus cultivos. La humedad relativa (HR) afecta la transpiración de las plantas y la traslocación de nutrimentos hacia la parte aérea, teniendo como resultado un efecto en el estado nutrimental. En este estudio se planteó determinar si la concentración de la solución nutritiva, en términos de conductividad eléctrica (CE) (1.7, 2.2 y 2.7 dS m⁻¹), afecta el crecimiento, rendimiento y calidad de frutos en pepino creciendo bajo diferente HR (35%, 50%, 65%). Comparado con las plantas de HR a 35%, el rendimiento aumentó en 14 y 17% cuando la humedad fue de 50 y 65%, respectivamente. Sin embargo, este aumento fue más marcado al suministrar soluciones nutritivas de baja concentración (1.7 dS m⁻¹). En condiciones de alta HR (65%), disminuyó la concentración de NO₃⁻ (-21%), K⁺ (-16%), y Ca⁺⁺ (-14%) en el extracto de la savia del peciolo, mientras que en los frutos ocurrieron tendencias similares con el NO₃⁻ (-26%) y el K⁺ (-13%). En contraste, el Ca⁺⁺ aumentó hasta 24%. La HR modificó el balance entre el NO₃⁻, K⁺ y Ca⁺⁺, siendo el óptimo de 19.3 para el K⁺/Ca⁺⁺ en frutos y de 8.7 para el NO₃⁻/Ca⁺⁺ en el peciolo. Se concluye que el pepino produce mayor rendimiento y calidad de fruto cuando la HR del invernadero se mantiene en 65% en combinación con una baja concentración de la solución nutritiva (1.7 dS m⁻¹).

Palabras clave: balance iónico, conductividad eléctrica, cultivos sin suelo, déficit de presión de vapor.

SUMMARY

Most cucumber growers in low-tech greenhouse do not pay attention to air moisture effect on crops. Relative humidity (RH) affects plant transpiration and nutrient translocation to the shoot, thereby, affecting nutritional status. The present study determined whether the concentration of the nutrient solution affects cucumbers plant growth in terms of electrical conductivity (CE) (1.7, 2.2 and 2.7 dS m⁻¹) fruit yield and quality under different RH (35%, 50%, 65%). Compared to plants under RH 35%, yield increased by 14 and 17% when the humidity increased to 50 and 65%, respectively. However, this increase was more marked with nutrient solutions of low concentration (1.7 dS m⁻¹). In high RH conditions (65%), NO₃⁻ (-21%), K⁺ (-16%), and Ca⁺⁺ (-14%) concentration in the petiole extract decreased, while similar trends occurred in fruit with NO₃⁻ (-26%) and K⁺ (-13%). In contrast, Ca⁺⁺ increased up to 24%. Relative humidity modified the balance among NO₃⁻, K⁺ and Ca⁺⁺, which is 19.3 optimal for K⁺/Ca⁺⁺ in fruit and 8.7 for NO₃⁻/Ca⁺⁺ in the petiole. In conclusion cucumber produces higher fruit quality and yield when RH of the greenhouse is at 65% in combination with nutrient solutions of low concentration (1.7 dS m⁻¹).

Index words: ionic balance, electrical conductivity, soilless crops, vapor pressure deficit.



check for
updates

Cita recomendada:

Valdez-Aguilar, L. A., Hernández-Velázquez, E., Hernández-García, R., Pérez-Rodríguez, P., & Alvarado-Camarillo, D. (2024). La Humedad Relativa y Concentración de la Solución Nutritiva Afectan el Rendimiento, Calidad y Estado Nutrimental en Pepino (*Cucumis sativus* L.). *Terra Latinoamericana*, 42, 1-14. e1968. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1968>

Recibido: 22 de mayo de 2024.

Aceptado: 26 de junio de 2024.

Artículo. Volumen 42.

Agosto de 2024.

Editor de Sección:

Dr. Pablo Preciado Rangel

Editor Técnico:

Dra. Elizabeth Hernández Acosta



Copyright: © 2024 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

INTRODUCCIÓN

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una de las hortalizas de mayor importancia a nivel mundial. En 2022, México ocupó el quinto lugar en la producción de esta hortaliza con 1 028 568 toneladas (t), equivalente al 1.1% del volumen de producción (SIAP, 2023). Asimismo, el país ocupó el segundo lugar como exportador, participando con el 17.6% del mercado internacional (SIAP, 2023). Para la producción de pepino se emplean diferentes sistemas de producción, entre los que destaca el cultivo a campo abierto, en casa sombra y en macrotúneles. Sin embargo, debido a la necesidad de producir alimentos donde no se cuenta con suficiente superficie para el cultivo, el pepino también se produce en invernaderos (Liu *et al.*, 2020). El 8.9% del total de la superficie cultivada con pepino en México corresponde a sistemas de producción en invernadero, en los que se obtiene un rendimiento promedio de 193.6 Mg ha⁻¹, superando en casi cinco veces el rendimiento obtenido en campo abierto (SIAP, 2020). El mayor rendimiento y frutos de mejor calidad obtenidos en pepinos cultivados en invernaderos se debe a que estos permiten condiciones ambientales óptimas para producir incluso fuera de temporada (Pardossi, Tognoni y Incrocci, 2004).

Al interior del invernadero, factores ambientales como la transmisión y distribución de la luz (Nemali, 2022), la temperatura (Kim, Lee, Kwon y Kim, 2022), la concentración de CO₂ (Zhang, Yasutake, Hidaka, Kitano y Okayasu, 2020) y la humedad relativa (HR) (Lu *et al.*, 2015) son modificados debido al efecto invernadero, el tipo de cubierta y la reducción en la tasa de intercambio de aire con el exterior de la estructura. Sin embargo, los productores de hortalizas en invernadero de mediana o baja tecnología no prestan atención al efecto de la humedad del aire en sus cultivos (Leonardi, Guichard, y Bertin, 2000). Esto se debe a que la HR es el factor ambiental más difícil de controlar por los altos costos que implica la instalación y el manejo de los sistemas activos para el calentamiento y enfriamiento. Ante esta situación, los productores intentan mantener un nivel adecuado de la humedad del aire a través del manejo del grado de apertura o cierre de las ventilas para regular la velocidad de salida del vapor de agua cuando es requerido (Gruda, 2005).

La HR y la temperatura influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas. El incremento en la temperatura va ligado con un aumento en la capacidad del aire para retener vapor de agua, y por consecuencia se reduce la HR si no hay más aportes de agua en estado gaseoso. En cambio, una baja temperatura se asocia con una menor capacidad del aire de retener vapor de agua y, por lo tanto, aumenta la HR. Las plantas reducen la transpiración cuando la HR es muy alta, lo que puede provocar que disminuya el crecimiento, sin embargo, cuando la HR es baja, la transpiración aumenta excesivamente, provocando deshidratación y reducción de la calidad y el rendimiento (Lu *et al.*, 2015; McAdam y Brodribb, 2016; Du, Zhang, Jiao, Song y Li, 2018). La humedad del aire impacta el estado hídrico de las plantas al afectar todos los procesos asociados con la transpiración (Medina *et al.*, 2019), como son el balance hídrico (Grossiord *et al.*, 2020), el intercambio de gases y enfriamiento de las hojas (Inoue *et al.*, 2021), y la translocación de nutrimentos (Jiao *et al.*, 2022).

La HR tiene un papel importante en el estado nutricional de las plantas debido a que afecta la conductancia estomatal. Una baja conductancia estomatal debida a alta HR se relaciona con la disminución en la transpiración, lo que a su vez disminuye la distribución de los nutrimentos transportados por el xilema (Roriz, Carvalho y Vasconcelos, 2014; White y Ding, 2023), creando condiciones para que se presenten deficiencias de algunos elementos. El presente estudio se planteó para determinar si la concentración de nutrimentos en la solución nutritiva podría afectar el crecimiento, rendimiento y calidad de frutos en plantas de pepino desarrolladas en ambientes con diferente HR.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio Experimental

El experimento se llevó a cabo de julio a octubre del 2021, en un invernadero de baja tecnología del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Las coordenadas geográficas son: 25° 21' 23.55" N, 101° 25' 16" O y 1763 m de altitud.

Material Vegetal y Conducción de las Plantas

Las semillas utilizadas para establecer el experimento fueron de pepino cv. Centauro. La siembra se realizó el 24 de julio del 2021 en contenedores de 7.5 cm de diámetro y 10 cm de altura. El sustrato utilizado fue una mezcla de turba ácida (Premier Horticulture Inc.) y perlita en relación 80:20 volumen por volumen. Las plantas obtenidas

se trasplantaron el 11 de agosto del 2021 en bolsas de polietileno negro de 10 L de capacidad, empleándose el mismo sustrato utilizado para la producción de las plántulas. En ambos casos, el pH de la turba ácida fue ajustado a 5.9 con bicarbonato de sodio y la conductividad eléctrica (CE) inicial fue 0.2 deciSiemens por metro.

Las plantas se condujeron a un solo tallo mediante la eliminación (a partir de los 20 días después del trasplante y hasta el término del estudio) de los tallos que se desarrollen en las axilas de las hojas. Las plantas se tutoraron mediante el sistema holandés utilizando hilo de polipropileno que se fijaba con un anillo en la base del tallo y el cual se sostuvo de un alambre a 2.5 m de altura. Las plantas fueron enredadas conforme crecían y fijando más anillos a lo largo del tallo para un mejor manejo. Después del primer corte de fruto y hasta el término del experimento, se realizó la poda de las hojas basales manteniendo una hoja bajo el siguiente fruto a cosechar. La cosecha de frutos inició el 27 de septiembre y se mantuvo a un ritmo de dos cortes por semana hasta el día 30 de octubre, día en el que se realizó la última cosecha.

Tratamientos

Los tratamientos consistieron en tres soluciones nutritivas de diferente concentración en las que el balance entre nutrimentos se mantuvo constante. La solución nutritiva de alta concentración tuvo una CE de 2.7 dS m⁻¹ y concentración de (meq L⁻¹): 16.25 NO₃⁻, 1.88 H₂PO₄⁻, 6.35 SO₄²⁻, 6.63 K⁺, 11.85 Ca⁺⁺ y 4.26 Mg⁺⁺. La solución de concentración intermedia tuvo una CE de 2.2 dS m⁻¹ y la concentración de nutrimentos fue 20% menor que la de alta concentración (meq L⁻¹): 13.00 NO₃⁻, 1.50 H₂PO₄⁻, 5.08 SO₄²⁻, 5.15 K⁺, 10.28 Ca⁺⁺ y 3.41 Mg⁺⁺. La solución nutritiva de baja concentración tuvo una CE de 1.7 dS m⁻¹ y concentración de nutrimentos 40% menor que la de alta concentración (meq L⁻¹): 9.75 NO₃⁻, 1.13 H₂PO₄⁻, 4.10 SO₄²⁻, 3.98 K⁺, 7.71 Ca⁺⁺ y 2.55 Mg⁺⁺. Las soluciones nutritivas se prepararon con sales grado fertilizante y se calcularon considerando la composición química del agua utilizada; en todos los casos el pH de las soluciones osciló entre 5.6 y 5.9 (Hanna Combo HI 98129, Hanna Instruments, Inc., Smithfield, RI, USA), permitiendo una alcalinidad total final de 1.0 meq L⁻¹. Los micronutrimentos se aportaron a una concentración de (mg L⁻¹): 5.0 Fe-EDTA, 0.4 Zn-EDTA, 2.6 Mn-EDTA, 0.5 Cu-EDTA, 0.2 B (Na₂[B₄O₅(OH)₄] · 8H₂O) y 0.2 Mo (Na₂MoO₄). Los riegos se realizaron manualmente con las soluciones nutritivas correspondientes cuando tensiómetros (modelo LT, Irrrometer Co., Riverside, CA) colocados en el sustrato marcaban 7.0 centibares. El volumen de riego por contenedor fue ajustado para mantener el drenaje en 30%.

Las soluciones nutritivas se aplicaron a plantas colocadas en tres cámaras de crecimiento ubicadas dentro del invernadero y construidas con plástico transparente calibre 200. A una cámara se le cubrió la parte del techo y los lados con el plástico; mediante la apertura y cierre de las cortinas laterales se manipulaba la HR de la cámara, la cual fue en promedio de HR 35% durante el día. En la segunda y tercer cámara se cubrieron el techo y las partes laterales; a estas últimas se les abrió dos (70 × 60 cm) y una (60 × 60 cm) ventana, respectivamente, colocadas en la parte media. En la segunda y tercer cámara se utilizaron humidificadores ultrasónicos de 8 cabezas (Vevor, México) conectados a un sensor de humedad calibrado a una HR de 50 y 65%, respectivamente, con un higrostat (modelo IHC-200, Inkbird Tech). Para la distribución uniforme de la humedad generada por los humidificadores se instalaron ventiladores (Macilux Turbo, Macilux) dentro de las cámaras. En el caso de la primera cámara no fue necesario instalar humidificadores, ya que la HR se generó a partir de la evapotranspiración del cultivo y el manejo de las ventilas laterales del invernadero.

La temperatura al interior de las cámaras fue de 22.1 °C (máxima = 33.2 °C, mínima = 15.3 °C), 22.6 °C (máxima = 35.2 °C, mínima = 15.2 °C) y 22.0 °C (máxima=32.7 °C, mínima=14.5 °C) para las cámaras con HR de 35, 50 y 65%, respectivamente, mientras que la radiación fotosintéticamente activa promedio diario fue de 314, 330 y 298 μmol m⁻² s⁻¹ (Light Scout, Spectrum Technologies, Inc., EUA).

Variables Evaluadas

Al finalizar el estudio, se contabilizó el número de hojas y se hizo un muestro destructivo de las plantas, recolectando el material vegetal para medir el peso fresco de hojas y tallo. La altura de la planta se midió desde la base hasta el ápice del tallo mientras que el diámetro fue medido en la base del mismo.

Los frutos se cosecharon cuando mostraban una superficie lisa y sin espinas y cuando en el ápice se observó un cambio de coloración de verde oscuro a verde claro o amarillo. Los frutos se contabilizaron y pesaron inmediatamente después de cosechar, y al terminar el estudio se sumaron para calcular el rendimiento total por planta. Al cosecharse los frutos, se les midió el diámetro ecuatorial y la longitud del mismo. Para determinar la curvatura de los frutos estos se colocaron horizontalmente sobre una superficie plana permitiendo que la parte proximal estuviera totalmente en contacto con la superficie; posteriormente se midió la distancia de separación entre la superficie plana y el centro de la parte distal del fruto.

Una muestra de la tercer y cuarta hojas más jóvenes y de los frutos obtenidos del penúltimo corte, se condujeron al laboratorio. Se obtuvieron muestras del peciolo y de la pulpa del fruto, las cuales fueron maceradas en un mortero para obtener el extracto celular, al cual se le midió la concentración de NO_3^- , K^+ y Ca^{++} empleando los ionómetros correspondientes (LaquaTwin, HORIBA, Japón). Con estos datos en mg L^{-1} se calculó el balance entre NO_3^-/K^+ , $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{++}$ y $\text{K}^+/\text{Ca}^{++}$ tanto en el peciolo como en el fruto.

Diseño Experimental

Los tres niveles de concentración de la solución nutritiva definidos en términos de CE (1.7, 2.2 y 2.7 dS m^{-1}) fueron aleatorizados dentro de cada una de las tres cámaras con diferentes niveles de HR promedio (35%, 50% y 65%), resultando en un experimento factorial. Las concentraciones de la solución nutritiva contaron con cuatro repeticiones de dos plantas cada una y fueron distribuidas en un diseño en bloques al azar. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza y la prueba de comparación de medias múltiples de Duncan ($P \leq 0.05$) utilizando el programa estadístico Statistical Analysis System (SAS) versión. 9.0 (SAS Institute, 2002)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El rendimiento de fruto aumentó en 14 y 17% cuando la HR se incrementó a 50 y 65%, respectivamente (Cuadro 1). Sin embargo, una alta CE de la solución (2.2 y 2.7 dS m^{-1}) se asoció con una reducción del 15% en la producción de fruto (Cuadro 1). El efecto de la CE fue influenciado por la interacción con la HR del aire (Cuadro 1), ya que el incremento de humedad resultó favorable para el rendimiento solo en caso de irrigar las plantas con las soluciones de menor concentración (1.7 y 2.2 dS m^{-1}) (Figura 1). Cuando la HR fue del 35%, no se observó efecto de la concentración de la solución nutritiva; sin embargo, cuando la HR fue de 50 y 65%, la solución con CE de 1.7 dS m^{-1} se asoció con el aumento en 29 y 68% del rendimiento, respectivamente (Figura 1); con la solución con 2.2 dS m^{-1} , el aumento fue de 13 y 31% (Figura 1). El mayor rendimiento de fruto obtenido en plantas tratadas con HR del 50 y 65% estuvo relacionado con la producción de un mayor número de frutos (Cuadro 1; Figura 2) y con frutos de mayor peso (Cuadro 1; Figura 3).

Alsadon *et al.* (2016) demostraron tendencias similares a las observadas en el presente estudio, pues señalan que la HR, en interacción con la temperatura al interior del invernadero, son los factores que más afectan el rendimiento en pepino; los autores reportan una relación positiva entre la producción de fruto y la HR diurna, ya que cuando esta fue del 79.88% obtuvieron cerca de 6.4 kg planta^{-1} , mientras que con menor HR, 68.51 y 62.5%, el rendimiento disminuyó en 19.5 y 14%, respectivamente. En contraste con nuestros resultados, Suzuki *et al.* (2015) señalan que en tomate no hubo efecto significativo sobre el rendimiento entre plantas crecidas en condiciones de mayor HR; sin embargo, estos resultados posiblemente se debieron a que las condiciones de HR impuestas por los autores (la HR promedio en el invernadero de alta y baja HR fue de 79.9 y 74.0%, respectivamente), no fueron lo suficientemente contrastantes para que se manifieste la influencia de este factor ambiental.

Cuadro 1. Efecto de la interacción entre la humedad relativa (HR) del ambiente y la concentración de la solución nutritiva en términos de la conductividad eléctrica (CE) sobre el rendimiento y características físicas del fruto en pepino.

Table 1. Interaction effect between relative humidity (HR) and nutrient solution concentration in terms of electrical conductivity (CE) on yield and physical traits of cucumber fruit.

Factor	Nivel	Rendimiento total	Peso de frutos	Número de frutos	Longitud	Diámetro	Curvatura
		g planta^{-1}	g		cm	mm	mm
HR (%)	35	3885.7 c†	378.9 b	10.3 b	22.3 b	51.3 b	9.33 a
	50	4436.3 b	386.8 b	11.5 a	22.2 b	51.7 b	9.73 a
	65	5205.4 a	451.3 a	11.5 a	23.5 a	53.1 a	7.54 b
		$P < 0.001$	$P < 0.001$	$P < 0.035$	$P < 0.001$	$P = 0.036$	$P < 0.001$
CE (dS m^{-1})	1.7	5043.7 a	421.2 a	11.9 a	22.9	52.5	9.26
	2.2	4222.7 b	396.3 b	10.7 b	22.5	51.5	9.11
	2.7	4261.0 b	399.6 b	10.7 b	22.6	53.1	8.23
		$P < 0.001$	$P = 0.019$	$P = 0.021$	$P = 0.190$	$P = 0.395$	$P = 0.157$
Interacción		$P < 0.001$	$P = 0.253$	$P = 0.007$	$P = 0.284$	$P = 0.106$	$P = 0.050$

† Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $P < 0.05$.

† Means followed by the same letter indicate non-significant differences according to Duncan's test with $P < 0.05$.

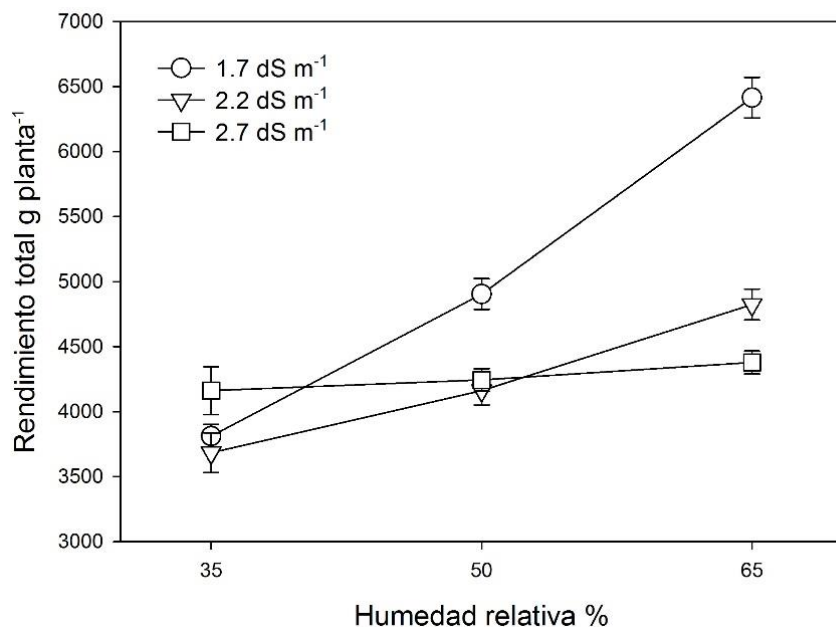


Figura 1. Efecto de la interacción entre la humedad relativa del aire y la concentración de la solución nutritiva en términos de conductividad eléctrica sobre el rendimiento de fruto en pepino. Las barras representan el error estándar de la media.

Figure 1. Interaction effect between air relative humidity and nutrient solution concentration in terms of electrical conductivity on cucumber fruit yield. Bars represent standard error of the mean.

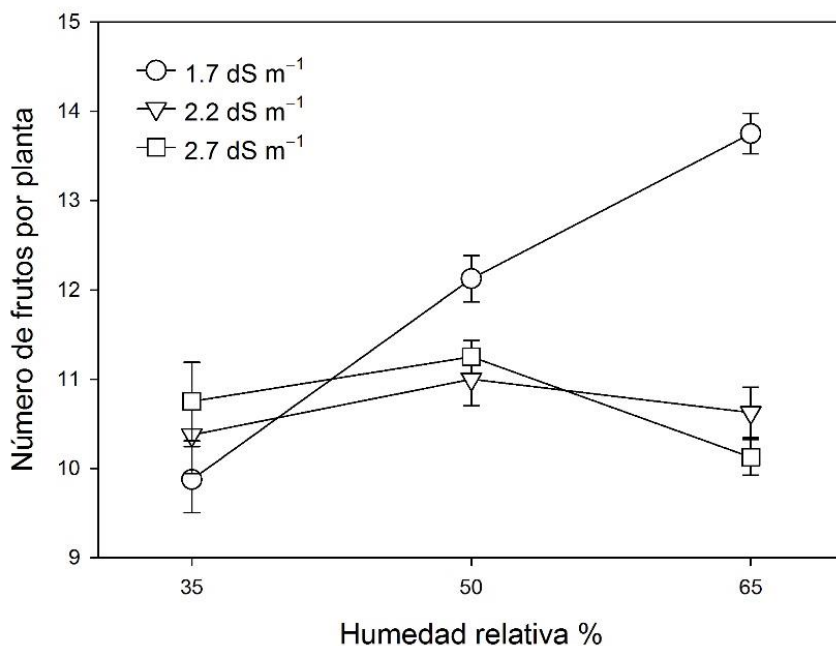


Figura 2. Efecto de la interacción entre la humedad relativa del aire y la concentración de la solución nutritiva en términos de conductividad eléctrica sobre el número de frutos producidos por planta en pepino. Las barras representan el error estándar de la media.

Figure 2. Interaction effect between air relative humidity and nutrient solution concentration in terms of electrical conductivity on fruit number produced by cucumber plants. Bars represent the standard error of the mean.

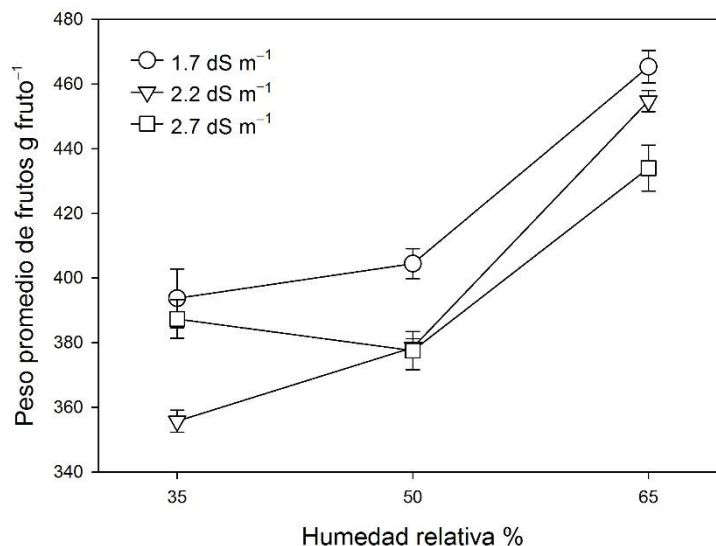


Figura 3. Efecto de la interacción entre la humedad relativa del aire y la concentración de la solución nutritiva en términos de la conductividad eléctrica sobre el peso promedio de fruto en pepino. Las barras representan el error estándar de la media.

Figure 3. Interaction effect between air relative humidity and nutrient solution concentration in terms of electrical conductivity on the average weight of cucumber fruit. Bars represent the standard error of the mean.

Parámetros de calidad del fruto, como la longitud y el diámetro, también fueron afectados por la HR, aunque la concentración de la solución nutritiva no tuvo efecto (Cuadro 1). Los frutos que se desarrollaron en un ambiente con HR del 65% fueron de mejor calidad ya que resultaron ser 5.5% más largos y con un 8.2% mayor diámetro que los desarrollados con HR de 35%. El menor tamaño de los frutos obtenidos en condiciones de baja HR puede deberse a que tal condición afecta la tasa relativa de crecimiento, como se ha señalado en tomates creciendo en condiciones de alto déficit de presión de vapor DPV (Leonardi *et al.*, 2000). Leonardi *et al.* (2000) proponen que un ambiente seco afecta al desarrollo de los frutos debido al efecto de la baja HR, o alto DPV, en el estado hídrico de la planta, y la subsecuente reducción en el transporte de agua hacia el fruto, afectando el crecimiento y calidad final. Araya *et al.* (2021) reportaron que la humedad del aire también afecta la calidad del fruto en tomate en términos del sabor, señalando que los sólidos soluble totales, la acidez y la CE aumentan conforme se eleva la HR, o el DPV es menor. La curvatura de frutos es un defecto que disminuye la calidad de los pepinos debido a que el mercado demanda frutos lo más recto posible; en el presente estudio, los frutos resultaron con menor curvatura cuando se desarrollaron con HR de 65% (Cuadro 1); sin embargo, de acuerdo con la interacción entre ambos factores, cuando se empleó la solución nutritiva de baja concentración (1.7 y 2.2 dS m⁻¹), el efecto positivo de la HR en la rectitud de los frutos fue mayor (Figura 4).

El pepino es un cultivo de alta demanda hídrica y muy susceptible al déficit de humedad (Das *et al.*, 2022), especialmente durante la etapa de floración y desarrollo del fruto. Lo anterior se atribuye al alto contenido de agua en este órgano (Zhang *et al.*, 2018) y a la gran superficie de sus hojas, las cuales alcanzan una tasa de transpiración de hasta 10 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ (Ding *et al.*, 2020). La reducción del rendimiento y calidad de fruto observado en plantas en condiciones de baja HR puede estar relacionado al estrés hídrico causado por la excesiva transpiración que ocurre con baja humedad del aire, como se demostró en rosas por Katsoulas, Baille y Kittas, (2001) en mediciones realizadas antes del mediodía, y en plántulas de pepino por Shibuya, Terakura, Kitaya y Kiyota (2006). La transpiración aumenta cuando la HR es baja debido a la mayor demanda evaporativa del aire, como fue demostrado en tomate por Lu *et al.* (2015) bajo un alto DVP causado por una baja HR, y por Leonardi *et al.* (2000), quienes señalan que este efecto es más notorio antes al mediodía solar. El incremento de la transpiración cuando hay baja HR también se debe a una mayor conductancia estomática, ya que las células guarda no logran compensar rápidamente el agua que han transpirado (Ding *et al.*, 2022; Leonardi *et al.*, 2000), ocasionando que los estomas se mantengan abiertos (Schoppach y Sadok, 2012). Este desbalance entre la alta tasa de transpiración y la baja absorción de agua ocasiona el marchitamiento de las hojas y alteración del metabolismo, resultando en la producción de frutos con 16% (Leonardi *et al.*, 2000) a 20% (Gautier, Guichard y Tchamitchian, 2001) menor peso.

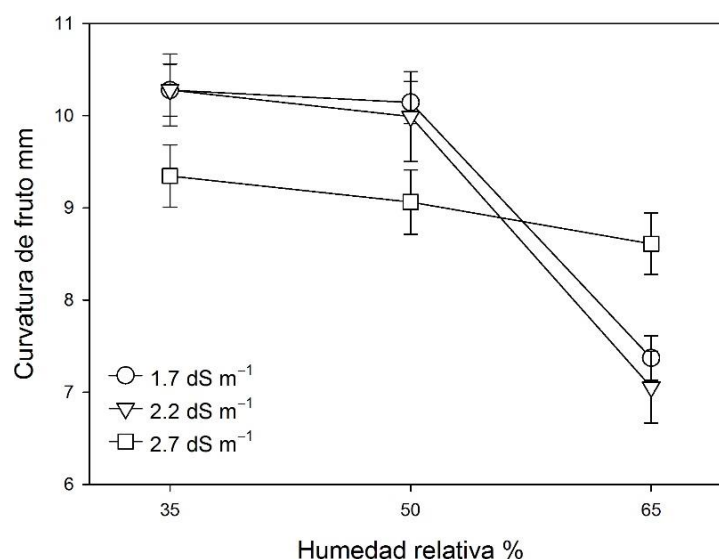


Figura 4. Efecto de la interacción entre la humedad relativa del aire y la concentración de la solución nutritiva en términos de conductividad eléctrica sobre la curvatura de los frutos en pepino. Las barras representan el error estándar de la media.

Figure 4. Interaction effect between air relative humidity and nutrient solution concentration in terms of electrical conductivity on fruit curvature in cucumbers. Bars represent the standard error of the mean.

La CE es un indicador del grado de concentración de iones y la salinidad de una solución. Los resultados obtenidos indican que el aumento en la concentración de la solución nutritiva causó una reducción en el rendimiento y en el peso y número de frutos (Figuras 1, 3). Lo anterior se puede deber a que, al incrementarse la concentración iónica, y por lo tanto la CE, disminuye el potencial hídrico (Razzaghi *et al.*, 2011), imponiendo un estrés osmótico sobre las plantas. De acuerdo con Sheldon, Dalal, Kirchhof, Kopittke y Menzies (2017), la salinidad reduce el acceso del agua a las plantas debido a su efecto sobre la fuerza osmótica de la solución. Para adaptarse a este estrés osmótico, las plantas realizan un ajuste para continuar absorbiendo agua. Este ajuste requiere invertir energía por parte de las plantas, resultando en la reducción del crecimiento y producción de frutos (Sheldon *et al.*, 2017). Además, es necesario considerar también que el pepino es una especie sensible a la salinidad, pues se ha indicado que la CE óptima para esta especie es de 2.2 dS m⁻¹ en la etapa vegetativa y de 2.1 dS m⁻¹ durante la fructificación (Savvas, Gianquinto, Tuzel y Gruda (2013), lo que ocasiona la obtención de rendimientos no satisfactorios por este factor (Kaloterakis, van Delden, Hartley y De Deyn, 2021).

El peso fresco aéreo fue afectado tanto por la HR como por la concentración de la solución nutritiva (Cuadro 2); la mayor biomasa se desarrolló cuando las plantas estuvieron en condiciones de 50% de HR y fueron irrigadas con soluciones de 1.7 dS m⁻¹ (Figura 5).

El mayor peso fresco aéreo estuvo asociado con mayor peso de las hojas y del tallo (Cuadro 2). Sin embargo, el mayor peso no mostró relación con el rendimiento de fruto ya que plantas con baja biomasa e irrigadas con la solución de 1.7 dS m⁻¹ y que se desarrollaron con HR del 65% (Figura 5) fueron las que produjeron el mayor rendimiento. Similarmente, los tallos fueron de mayor longitud cuando las plantas se irrigaron con soluciones de baja concentración; sin embargo, el diámetro del tallo y el número de hojas no fueron afectados (Cuadro 2). La altura y el diámetro de tallo no fueron afectados por la HR, aunque el número de hojas es menor cuando la HR fue del 50% pues estas se reducen de a 42.9 hojas por planta (Cuadro 2). Tendencias similares se reportaron por Lu *et al.* (2015) en tomate bajo condiciones de alta HR, ya que el peso seco de las hojas, tallos y el total aéreo fueron mayores que el obtenido por las plantas desarrolladas en baja HR. Bajo condiciones de alto DPV, se ha demostrado que la tasa de fotosíntesis en pepino disminuye significativamente (Alsadon *et al.*, 2016), lo cual explicaría la menor biomasa acumulada que se observó en las plantas que se desarrollaron bajo condiciones de baja HR, así como la reducción en la altura, como lo señaló Shamshiri *et al.* (2018). De acuerdo con Lu *et al.* (2015) un aumento de la humedad mediante la nebulización dentro del invernadero mejora las condiciones para las plantas debido al aumento de la fotosíntesis neta, lo cual produce una mayor biomasa y rendimiento.

Cuadro 2. Efecto de la interacción entre la humedad relativa (HR) del ambiente y la concentración de la solución nutritiva en términos de conductividad eléctrica (CE) sobre el crecimiento de plantas de pepino.
Table 2. Interaction effect between relative humidity (HR) and nutrient solution concentration in terms of electrical conductivity (CE) on cucumber plant growth.

Factor	Nivel	Altura de planta m	Número de hojas	Peso fresco			Diámetro de tallo mm
				Hojas	Tallo	Aéreo	
HR (%)	35	4.06	45.6 ab	336.7 b	219.8 b	556.4 b	13.5
	50	4.23	42.9 b	384.1 a	258.6 a	642.7 a	13.7
	65	4.26	45.5 a	279.1 c	251.6 a	530.7 b	13.6
		$P = 0.096$	$P = 0.041$	$P < 0.001$	$P = 0.001$	$P < 0.001$	$P = 0.731$
CE (dS m ⁻¹)	1.7	4.25 a	45.1	360.1 a	260.3 a	620.3 a	14.1
	2.2	4.25 a	43.8	325.8 ab	251.9 a	577.8 ab	13.3
	2.7	4.04 b	43.2	314.0 b	217.8 b	531.8 b	13.4
		$P = 0.042$	$P = 0.169$	$P = 0.049$	$P < 0.001$	$P = 0.002$	$P = 0.115$
Interacción		$P = 0.516$	$P = 0.606$	$P = 0.255$	$P = 0.047$	$P = 0.047$	$P = 0.452$

† Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $P < 0.05$.

† Means followed by the same letter indicate non-significant differences according to Duncan's test with $P < 0.05$.

En general, la concentración de NO_3^- , K^+ y Ca^{++} fue mayor en el peciolo en comparación con el fruto (Cuadro 3), lo cual puede estar relacionado con la menor frecuencia estomática que presentan estos últimos, ocasionando una menor transpiración en comparación con las hojas y un menor transporte de elementos hacia ese órgano (Susuki *et al.*, 2015). La concentración de iones en el extracto del peciolo se redujo al aumentar la HR, mientras que el NO_3^- aumentó al elevarse la concentración de la solución independientemente de la HR (Cuadro 3); en el caso de los frutos, no hubo efecto de la CE de la solución, pero el Ca^{++} aumentó al elevarse la HR, mientras que el NO_3^- y K^+ disminuyeron (Cuadro 3).

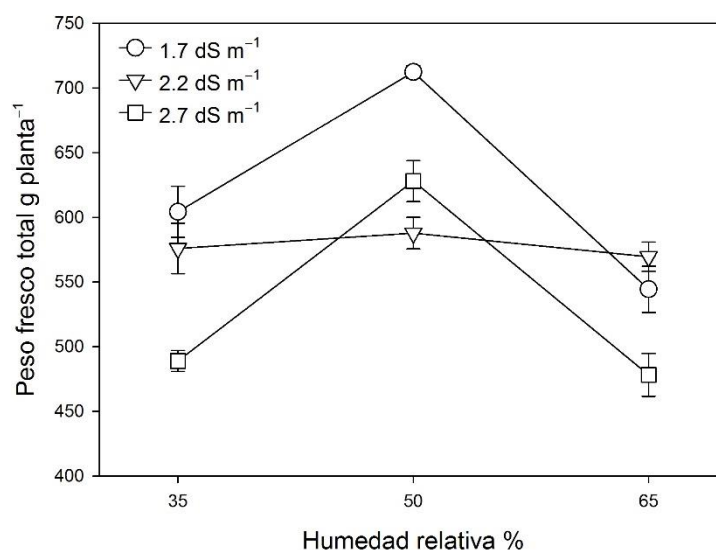


Figura 5. Efecto de la interacción entre la humedad relativa del aire y la concentración de la solución nutritiva en términos de conductividad eléctrica sobre el peso fresco total en plantas de pepino. Las barras representan el error estándar de la media.

Figure 5. Interaction effect between air relative humidity and nutrient solution concentration in terms of electrical conductivity on the total shoot fresh weight of cucumber plants. Bars represent the standard error of the mean.

Cuadro 3. Efecto de la interacción entre la humedad relativa (HR) del ambiente y la concentración de la solución nutritiva en términos de conductividad eléctrica (CE) sobre la concentración de iones de NO_3^- , K^+ , y Ca^{++} en frutos y peciolo de plantas de pepino.
Table 3. Interaction effect between relative humidity (HR) and nutrient solution concentration in terms of electrical conductivity (CE) on NO_3^- , K^+ , and Ca^{++} ions concentration in fruits and petioles of cucumber plants.

Factor	Nivel	Frutos			Peciolo		
		NO_3^-	Ca^{++}	K^+	NO_3^-	Ca^{++}	K^+
		----- mg L ⁻¹ -----			----- mg L ⁻¹ -----		
HR (%)	35	73.8 a	46.3 b	1388 a	6263 a	613 a	4508 a
	50	54.5 c	47.3 b	1213 b	4938 c	513 b	3858 b
	65	68.3 b	57.5 a	1225 b	5533 b	585 a	4183 b
		$P < 0.001$	$P < 0.001$	$P < 0.001$	$P < 0.001$	$P < 0.007$	$P < 0.003$
CE (dS m ⁻¹)	1.7	67.0	51.3	1258	5179 b	558	4133
	2.2	65.9	50.4	1267	5796 a	575	4379
	2.7	64.3	49.3	1300	5758 a	577	4138
		$P = 0.554$	$P = 0.770$	$P = 0.356$	$P = 0.019$	$P = 0.812$	$P = 0.096$
Interacción		$P = 0.268$	$P = 0.112$	$P = 0.785$	$P = 0.250$	$P < 0.011$	$P = 0.009$

† Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con $P < 0.05$.

‡ Means followed by the same letter indicate non-significant differences according to Duncan's test with $P < 0.05$.

En tomate se han reportado tendencias similares ya que, en condiciones de baja CE, el K^+ y Ca^{++} en las hojas disminuyó con alta humedad del aire, lo que sugiere que la alta HR podría suprimir la absorción y distribución de los nutrimentos (Susuki *et al.*, 2015). Los resultados obtenidos también coinciden con los reportados por Houshmandfar *et al.* (2018), quienes demostraron que existe una relación lineal positiva entre la tasa de transpiración y la absorción de N, K, S, Ca, Mg, y Mn en hojas de trigo. La disminución en el contenido nutrimental puede estar relacionado con la menor transpiración que ocurre en condiciones de alta HR (Arve, Torre, Olsen y Tanino, 2011) ocasionada por la menor demanda evaporativa del aire al estar saturado con vapor, lo cual se ha asociado también con la reducción en el flujo de masas en la rizosfera (Houshmandfar *et al.*, 2018) y el movimiento del agua y la traslocación de los nutrimentos a través del xilema (Shamshiri *et al.*, 2018).

En el caso del Ca^{++} , la concentración de este elemento fue afectada por la HR, aunque al igual que el NO_3^- y K^+ , presentó una tendencia a disminuir en el peciolo al subir la HR (Cuadro 3). Sin embargo, en el caso del fruto, la tendencia fue opuesta, ya que el Ca^{++} se incrementó cuando las plantas se desarrollaron en un ambiente con alta HR (Cuadro 3). La disminución del Ca^{++} en las hojas es ocasionada por los mismos factores que afectan la absorción de otros nutrimentos en condiciones de baja transpiración asociada con alta HR, lo que indica que la acumulación del Ca^{++} en las hojas es de manera pasiva (de Freitas, Shackel y Mitcham, 2011; Montanaro, Dichio, Lang, Mininni y Xiloyannis, 2015). Sin embargo, en el caso del fruto, se observó una mayor concentración de Ca^{++} a pesar de la baja transpiración en plantas creciendo en alta HR, lo cual puede deberse a que en estas condiciones de alta humedad la mayor parte del agua del xilema, hasta el 60%, es dirigida hacia el crecimiento del fruto (Montanaro *et al.*, 2015), favoreciendo la movilidad del Ca^{++} hacia este órgano. Lo anterior también fue demostrado por Montanaro *et al.* (2015) en frutos de kiwi al haber menor correlación entre la concentración de este nutrimento en el fruto y la tasa de transpiración. De Freitas *et al.* (2011) también coinciden con estos resultados y señalan que, aunque una baja transpiración restringe el movimiento de Ca^{++} , un ambiente de alta humedad se combina con un aumento en el Ca^{++} en los frutos debido a que el flujo del agua en el xilema se dirige hacia los ellos.

En el peciolo, el Ca^{++} y el K^+ tienden a disminuir cuando la HR se eleva de 35 a 50% (Figura 6). Sin embargo, al elevarse la HR hasta 65%, el Ca^{++} aumentó en plantas tratadas con una solución de baja CE (1.7 y 2.2 dS m⁻¹), en tanto que el K^+ lo hizo con una alta CE (2.7 dS m⁻¹) (Figura 6). Los datos indican que el NO_3^- (Cuadro 3) y el K^+ (Figura 6) en el peciolo se elevan, ya sea al aumentar la concentración de la solución nutritiva o al elevarse la HR si la solución nutritiva es de mayor concentración, respectivamente. Estos resultados sugieren que al aumentar la disponibilidad de nutrimentos mediante el aumento en la concentración de la solución nutritiva se compensa la reducción de la movilidad del NO_3^- y el K^+ en la savia, permitiendo de esta manera aportarlos en cantidades suficientes a pesar de la reducción en la traslocación asociada a la alta HR. En cuanto al Ca^{++} , Sonneveld y Voogt (2009) señalan que la distribución de este nutrimento entre los órganos de las plantas se reduce con una alta humedad ambiental, aunque la aplicación de niveles más elevados de Ca^{++} pueden moderar este efecto; sin embargo, los resultados de la presente investigación indican que el Ca^{++} en el peciolo de plantas creciendo con alta HR aumentó solo si esto se combina con una baja CE de la solución, lo cual se puede deber a la sensibilidad del pepino a la salinidad.

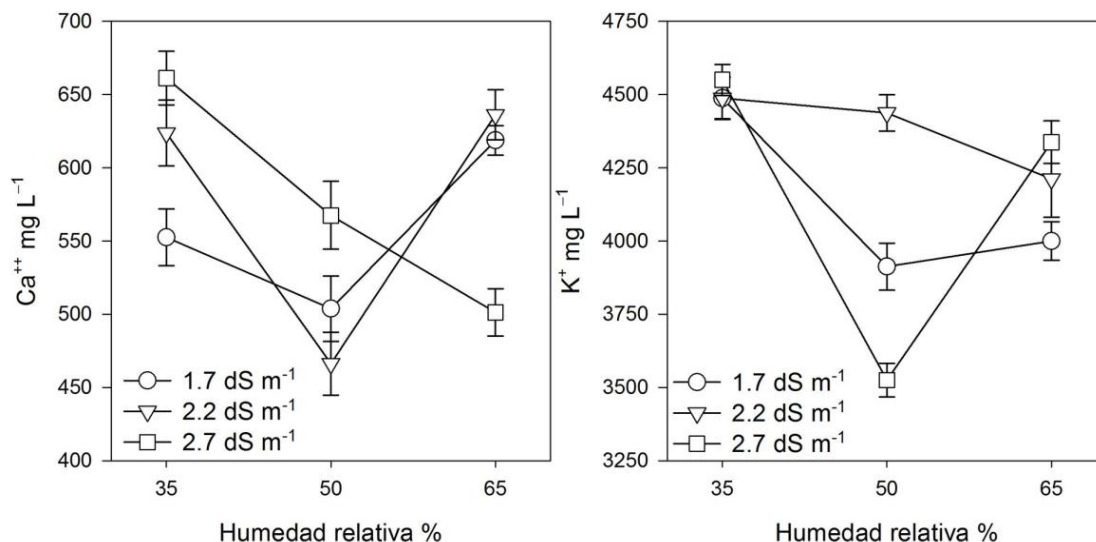


Figura 6. Efecto de la interacción entre la humedad relativa del aire y la concentración de la solución nutritiva en términos de conductividad eléctrica sobre la concentración de Ca⁺⁺ y K⁺ en el peciolo de plantas de pepino. Las barras representan el error estándar de la media.

Figure 6. Interaction effect between air relative humidity and nutrient solution concentration in terms of electrical conductivity on petiole Ca⁺⁺ and K⁺ concentration in cucumber plants. Bars represent the standard error of the mean.

En los frutos, el balance NO₃⁻/Ca⁺⁺ y K/Ca⁺⁺ disminuyó cuando la HR subió a 50% y 65%, mientras que el balance NO₃⁻/K⁺ fue menor cuando la HR fue del 50% (Cuadro 4). En contraste, en el peciolo, estos balances no fueron afectados por la HR, pero si por la interacción entre ambos factores (Cuadro 4), lo cual podría deberse a la mayor tasa de transpiración en los órganos vegetativos, misma que está asociada a la HR, ocasiona que el Ca⁺⁺ sea translocado preferentemente hacia tales órganos (Sonneveld y Voogt, 2009), causando así la modificación entre los balances nutrimentales. El balance NO₃⁻/K⁺ tendió a disminuir conforme aumenta la HR a 50% y 65% con las soluciones nutritivas de mayor concentración, 2.2 y 2.7 dS m⁻¹, sin embargo, cuando la solución nutritiva fue de baja concentración, este balance aumentó al subir la HR a 65% (Figura 7).

Cuadro 4. Efecto de la interacción entre la humedad relativa (HR) del ambiente y la concentración de la solución nutritiva en términos de conductividad eléctrica (CE) sobre el balance entre NO₃⁻, K⁺, y Ca⁺⁺ en frutos y peciolo de plantas de pepino.

Table 4. Interaction effect between relative humidity (HR) and nutrient solution concentration in terms of electrical conductivity (CE) on the balance between NO₃⁻, K⁺, and Ca⁺⁺ in cucumber fruit and petiole plants.

Factor	Nivel	Frutos			Peciolo		
		NO ₃ ⁻ /Ca ⁺⁺	K ⁺ /Ca ⁺⁺	NO ₃ ⁻ /K ⁺	NO ₃ ⁻ /Ca ⁺⁺	K ⁺ /Ca ⁺⁺	NO ₃ ⁻ /K ⁺
HR (%)	35	1.66 a	31.8 a	0.054 a	10.39	7.64	1.39
	50	1.17 b	26.2 b	0.045 b	10.24	8.52	1.27
	65	1.25 b	22.1 c	0.056 a	9.63	7.41	1.34
		<i>P</i> < 0.001	<i>P</i> < 0.001	<i>P</i> < 0.001	<i>P</i> < 0.439	<i>P</i> = 0.257	<i>P</i> = 0.118
CE (dS m ⁻¹)	1.7	1.37	26.2	0.053	9.6	7.78	1.26b
	2.2	1.34	26.1	0.052	10.41	8.24	1.33ab
	2.7	1.36	27.9	0.05	10.27	7.55	1.40a
		<i>P</i> = 0.946	<i>P</i> = 0.570	<i>P</i> = 0.176	<i>P</i> = 0.388	<i>P</i> = 0.605	<i>P</i> = 0.041
Interacción		<i>P</i> = 0.041	<i>P</i> = 0.386	<i>P</i> = 0.342	<i>P</i> = 0.038	<i>P</i> < 0.006	<i>P</i> = 0.023

† Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas de acuerdo a la prueba de Duncan con *P* < 0.05.

† Means followed by the same letter indicate non-significant differences according to Duncan's test with *P* < 0.05.

En cuanto a los balances $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{++}$ y $\text{K}^+/\text{Ca}^{++}$ en el peciolo, estos fueron más altos cuando la HR fue de 50% y la CE de la solución de 2.2 dS m^{-1} (Figura 7), mientras que con soluciones de 1.7 dS m^{-1} tienden a disminuir con HR de 65% (Figura 7). Con soluciones de 2.7 dS m^{-1} , el balance $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{++}$ y NO_3^-/K^+ fueron más altos cuando la HR subió a 65% (Figura 7). Los resultados muestran que tanto la HR como la concentración de la solución causaron un desbalance entre los nutrientes estudiados, los cuales están afectando también el crecimiento y rendimiento del pepino, como lo sugiere el hecho de que el balance $\text{K}^+/\text{Ca}^{++}$ en los frutos y el $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{++}$ en el peciolo mostraron correlación significativa con el rendimiento (Figura 8). Los datos obtenidos señalan que el balance óptimo entre estos iones debe ser de 19.3 y 8.7 unidades, respectivamente, para permitir la máxima producción (Figura 8), lo cual sugiere que para un alto rendimiento, el Ca^{++} debe mantenerse en alta concentración en condiciones de alta HR, pues una menor concentración de este elemento estaría ligada con el aumento en el balance con el NO_3^- y el K^+ , provocando baja producción. El balance $\text{K}^+/\text{Ca}^{++}$ en los frutos también estuvo asociado con la calidad del fruto, ya que estos fueron de mayor longitud y diámetro, así como más rectos y de mayor peso cuando este fue de 19.3.

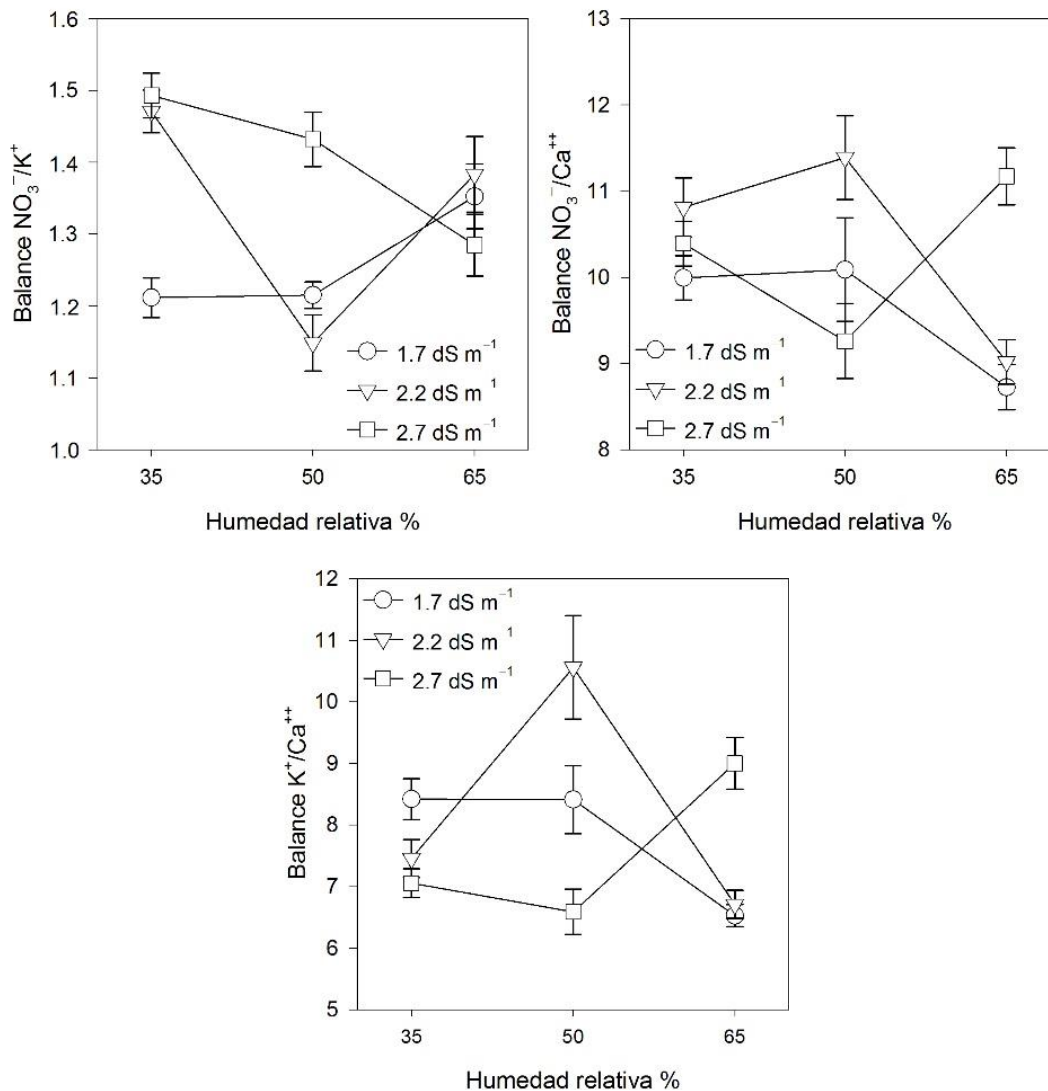


Figura 7. Efecto de la interacción entre la humedad relativa del aire y la concentración de la solución nutritiva en términos de conductividad eléctrica sobre el balance iónico en el peciolo de en plantas de pepino. Las barras representan el error estándar de la media.

Figure 7. Interaction effect between air relative humidity and nutrient solution concentration in terms of electrical conductivity on ion balance on the petiole of cucumber plants. Bars represent the standard error of the mean.

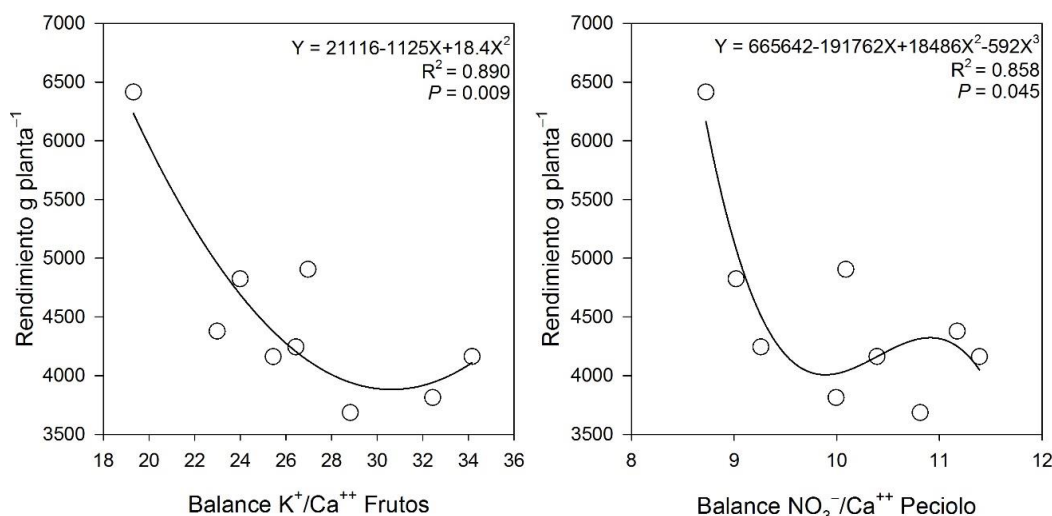


Figura 8. Relación entre el balance K^+/Ca^{++} en frutos y NO_3^-/Ca^{++} en el peciolo y el rendimiento de fruto en plantas de pepino desarrolladas bajo el efecto de la humedad relativa la conductividad eléctrica de la solución nutritiva. Las barras representan el error estándar de la media.

Figure 8. Relationship between K^+/Ca^{++} and NO_3^-/Ca^{++} balance in fruits and petiole, respectively, with fruit yield of cucumber plants developed under the effect of relative humidity and electrical conductivity of the nutrient solution. Bars represent the standard error of the mean.

CONCLUSIONES

La producción, calidad y crecimiento del pepino fue favorecida cuando las plantas se cultivaron con HR del 65%; en contraste, con 35%, el rendimiento y calidad de los frutos disminuyó. Tanto el mayor rendimiento como la mejor calidad de fruto se presentaron cuando la HR del 65% se combinó con la aplicación de una solución nutritiva de baja concentración (1.7 dS m^{-1}), por lo que no es necesario un mayor aporte de nutrimentos aun en condiciones de alta HR. Sin embargo, con alta HR, la aplicación de soluciones nutritivas de mayor concentración si permitió aumentar el K^+ . El Ca^{++} debe mantenerse en una alta concentración en condiciones de alta HR pues una menor concentración de este elemento estaría ligada con un aumento en el balance con el NO_3^- y el K^+ , provocando un bajo rendimiento.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

El presente estudio fue financiado por la Dirección de investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro a través del proyecto 2112: Respuestas de los cultivos hortícolas en invernadero a la humedad relativa y déficit de presión de vapor.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: L.A.V.A., P.P.R. y D.A.C. Metodología: L.A.V.A., P.P.R., y D.A.C. Software: D.A.C. Validación: L.A.V.A. y D.A.C. Análisis formal: P.P.R. y D.A.C. Investigación: E.H.V. y R.H.G. Recursos, L.A.V.A. Curación de datos: L.A.V.A., P.P.R. y D.A.C. Preparación del borrador original: E.H.V. y R.H.G. Escritura, revisión y edición: L.A.V.A. y D.A.C. Visualización: L.A.V.A., P.P.R., y D.A.C. Supervisión: L.A.V.A., y D.A.C. Administración del proyecto: L.A.V.A. Adquisición de fondos: L.A.V.A.

AGRADECIMIENTOS

No aplicable.

LITERATURA CITADA

- Alsadon, A., Al-Helal, I., Ibrahim, A., Abdel-Ghany, A., Al-Zaharani, S., & Ashour, T. (2016). The effects of plastic greenhouse covering on cucumber (*Cucumis sativus* L.) growth. *Ecological Engineering*, 87, 305-312. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.12.005>
- Araya, N. A., Chiloeane, T. S., Rakuambo, J. Z., Maboko, M. M., du Plooy, C. P., & Amoo, S. O. (2021). Effect of environmental variability on fruit quality and phytochemical content of soilless grown tomato cultivars in a non-temperature-controlled high tunnel. *Scientia Horticulturae*, 288, 110378. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110378>
- Arve, L. E., Torre, S., Olsen J. E., & Tanino, K. K. (2011) Stomatal responses to drought stress and air humidity. In A. Shanker (Ed.). *Abiotic stress in plants - mechanisms and adaptations* (pp. 267-280). London, United Kingdom: IntechOpen Publication. <https://doi.org/10.5772/24661>
- Das, A., Singh, S., Islam, Z., Munshi, A. D., Behera, T. K., Dutta, S., ... & Dey, S. S. (2022). Current progress in genetic and genomics-aided breeding for stress resistance in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Scientia Horticulturae*, 300, 111059. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111059>
- De Freitas, S. T., Shackel, K. A., & Mitcham, E. J. (2011). Abscisic acid triggers whole-plant and fruit-specific mechanisms to increase fruit calcium uptake and prevent blossom end rot development in tomato fruit. *Journal of Experimental Botany*, 62(8), 2645-2656. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq430>
- Ding, J., Jiao, X., Bai, P., Hu, Y., Zhang, J., & Li, J. (2022). Effect of vapor pressure deficit on the photosynthesis, growth, and nutrient absorption of tomato seedlings. *Scientia Horticulturae*, 293, 110736. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110736>
- Ding, X., Yu, L., Jiang, Y., Yang, S., He, L., Zhou, Q., ... & Huang, D. (2020). Changes in leaf length, width, area, and photosynthesis of fruit cucumber in a greenhouse production system. *HortScience*, 55(7), 995-999. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14637-19>
- Du, Q., Zhang, D., Jiao, X., Song, X., & Li, J. (2018). Effects of atmospheric and soil water status on photosynthesis and growth in tomato. *Plant, Soil & Environment*, 64(1), 13-19. <https://doi.org/10.17221/701/2017-PSE>
- Gautier, H., Guichard, S., & Tchamitchian, M. (2001). Modulation of competition between fruits and leaves by flower pruning and water fogging, and consequences on tomato leaf and fruit growth. *Annals of Botany*, 88(4), 645-652. <https://doi.org/10.1006/anbo.2001.1518>
- Grossiord, C., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, B., Siegwolf, R. T., ... & McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New phytologist*, 226(6), 1550-1566. <https://doi.org/10.1111/nph.16485>
- Gruda, N. (2005). Impact of environmental factors on product quality of greenhouse vegetables for fresh consumption. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24(3), 227-247. <https://doi.org/10.1080/07352680591008628>
- Houshmandfar, A., Fitzgerald, G. J., O'Leary, G., Tausz-Posch, S., Fletcher, A., & Tausz, M. (2018). The relationship between transpiration and nutrient uptake in wheat changes under elevated atmospheric CO₂. *Physiologia Plantarum*, 163(4), 516-529. <https://doi.org/10.1111/ppl.12676>
- Inoue, T., Sunaga, M., Ito, M., Yuchen, Q., Matsushima, Y., Sakoda, K., & Yamori, W. (2021). Minimizing VPD fluctuations maintains higher stomatal conductance and photosynthesis, resulting in improvement of plant growth in lettuce. *Frontiers in Plant Science*, 12, 646144. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.646144>
- Jiao, X., Yu, X., Ding, J., Du, Q., Zhang, J., Song, X., ... & Li, J. (2022). Effects of rising VPD on the nutrient uptake, water status and photosynthetic system of tomato plants at different nitrogen applications under low temperature. *Scientia Horticulturae*, 304, 111335. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111335>
- Kaloterakis, N., van Delden, S. H., Hartley, S., & De Deyn, G. B. (2021). Silicon application and plant growth promoting rhizobacteria consisting of six pure Bacillus species alleviate salinity stress in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Scientia Horticulturae*, 288, 110383. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110383>
- Katsoulas, N., Baille, A., & Kittas, C. (2001). Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106(3), 233-247. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00211-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00211-2)
- Kim, H. K., Lee, S. Y., Kwon, J. K., & Kim, Y. H. (2022). Evaluating the effect of cover materials on greenhouse microclimates and thermal performance. *Agronomy*, 12(1), 143. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010143>
- Leonardi, C., Guichard, S., & Bertin, N. (2000). High vapour pressure deficit influences growth, transpiration and quality of tomato fruits. *Scientia Horticulturae*, 84(3-4), 285-296. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00127-2](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00127-2)
- Liu, X., Li, Y., Ren, X., Chen, B., Zhang, Y., Shen, C., ... & Wu, D. (2020). Long-term greenhouse cucumber production alters soil bacterial community structure. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 306-321. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00109-9>
- Lu, N., Nukaya, T., Kamimura, T., Zhang, D., Kurimoto, I., Takagaki, M., ... & Yamori, W. (2015). Control of vapor pressure deficit (VPD) in greenhouse enhanced tomato growth and productivity during the winter season. *Scientia Horticulturae*, 197, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.001>
- McAdam, S. A., & Brodribb, T. J. (2016). Linking turgor with ABA biosynthesis: implications for stomatal responses to vapor pressure deficit across land plants. *Plant Physiology*, 171(3), 2008-2016. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00380>
- Medina, S., Vicente, R., Nieto-Taladriz, M. T., Aparicio, N., Chairi, F., Vergara-Díaz, O., & Araus, J. L. (2019). The plant-transpiration response to vapor pressure deficit (VPD) in durum wheat is associated with differential yield performance and specific expression of genes involved in primary metabolism and water transport. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1994. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01994>

- Montanaro, G., Dichio, B., Lang, A., Mininni, A. N., & Xiloyannis, C. (2015). Fruit calcium accumulation coupled and uncoupled from its transpiration in kiwifruit. *Journal of Plant Physiology*, *181*, 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.04.004>
- Nemali, K. (2022). History of controlled environment horticulture: Greenhouses. *HortScience*, *57*(2), 239-246. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI16160-21>
- Pardossi, A., Tognoni, F., & Incrocci, L. (2004). Mediterranean greenhouse technology. *Chronica Horticulturae*, *44*(2), 28-34.
- Razzaghi, F., Ahmadi, S. H., Adolf, V. I., Jensen, C. R., Jacobsen, S. E., & Andersen, M. N. (2011). Water relations and transpiration of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under salinity and soil drying. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *197*(5), 348-360. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00473.x>
- Roriz, M., Carvalho, S. M., & Vasconcelos, M. W. (2014). High relative air humidity influences mineral accumulation and growth in iron deficient soybean plants. *Frontiers in Plant Science*, *5*, 726. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00726>
- SAS Institute (2002). *Statistical Analysis System. User's Guide. Release 9.0*. Cary, NC, USA: SAS Institute, Inc.
- Savvas, D., Glanquinto, G., Tuzel, Y., & Gruda N. (2013). Soilless culture. In W. Baudoin, R. Nonno-Womdim, N. Lutaladio, A. Hodder, N. Castilla, C. Leonardi, C., De Pascale, M. Qaryouti, & R. Duffy (Eds.). *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: principles for mediterranean climate areas* (pp. 303-354). Rome, Italy: FAO
- Schoppach, R., & Sadok, W. (2012). Differential sensitivities of transpiration to evaporative demand and soil water deficit among wheat elite cultivars indicate different strategies for drought tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, *84*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.04.016>
- SIAP (Servicio de Información Alimentaria y Pesquera). (2020). Panorama Agroalimentario 2020. Consultado el 13 de febrero, 2023, desde https://nube.siap.gob.mx/panorama_siap/pag/2020/Atlas-Agroalimentario-2020
- SIAP (Servicio de Información Alimentaria y Pesquera). (2023). Panorama Agroalimentario 2023. Consultado el 13 de febrero, 2023, desde https://nube.siap.gob.mx/panorama_siap/pag/2022/Panorama-Agroalimentario-2022
- Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. *International Agrophysics*, *32*(2), 287-302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- Sheldon, A. R., Dalal, R. C., Kirchof, G., Kopittke, P. M., & Menzies, N. W. (2017). The effect of salinity on plant-available water. *Plant and Soil*, *418*, 477-491. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3309-7>
- Shibuya, T., Terakura, R., Kitaya, Y., & Kiyota, M. (2006). Effects of low relative humidity and illumination on leaf water status of cucumber seedlings and growth of harvested cuttings. *HortScience*, *41*(2), 410-413. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.2.410>
- Sonneveld, C., & Voogt, W. (2009). Calcium nutrition and climatic conditions. In C. Sonneveld, & W. Voogt (Eds.). *Plant nutrition of greenhouse crops* (pp. 173-201). Dordrecht, The Netherlands: Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6_9
- Suzuki, M., Umeda, H., Matsuo, S., Kawasaki, Y., Ahn, D., Hamamoto, H., & Iwasaki, Y. (2015). Effects of relative humidity and nutrient supply on growth and nutrient uptake in greenhouse tomato production. *Scientia Horticulturae*, *187*, 44-49. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.02.035>
- White, P. J., & Ding, G. (2023). Long-distance transport in the xylem and phloem. In Z. Rengel, I. Cakmak, & P. J. White (Eds.). *Marschner's mineral nutrition of plants* (pp. 73-104). Cambridge, MA, USA: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00002-2>
- Zhang, D., Liu, Y., Li, Y., Qin, L., Li, J., & Xu, F. (2018). Reducing the excessive evaporative demand improved the water-use efficiency of greenhouse cucumber by regulating the trade-off between irrigation demand and plant productivity. *HortScience*, *53*(12), 1784-1790. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13129-18>
- Zhang, Y., Yasutake, D., Hidaka, K., Kitano, M., & Okayasu, T. (2020). CFD analysis for evaluating and optimizing spatial distribution of CO₂ concentration in a strawberry greenhouse under different CO₂ enrichment methods. *Computers and Electronics in Agriculture*, *179*, 105811. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105811>