

Cáscara de cacahuete (*Arachis hypogaea* L.) como sustrato para la producción de chile habanero

Peanut shells (*Arachis hypogaea* L.) as a substrate for habanero pepper production

Cesar Tucuch-Haas¹ , Angélica Tuz-Can¹ , Georgina Chi-González¹ , Azareel Angulo-Castro² , Ismael Tucuch-Haas^{3*} 

¹Tecnológico Nacional de México/ITS del Sur del Estado de Yucatán, Carretera Muna-Felipe Carrillo Puerto Tramo Oxkutzcab-Akil, Km 41+400, CP. 97880. Oxkutzcab, Yucatán, México.

²Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, Km.17.5 Carretera Culiacán-El dorado, CP.80010. Culiacán, Sinaloa, México.

³Instituto Nacional de Investigación Forestal Agrícola y Pecuaria. Campo Experimental Mococho, Km 25 Carretera Mérida-Motul, CP. 97454. Mococho, Yucatán, México.

*Autor de correspondencia: leamsi182@hotmail.com

Artículo científico

Recibido: 21 de agosto 2025

Aceptado: 14 de noviembre 2025

RESUMEN. La cáscara de cacahuete (*Arachis hypogaea* L.) es un subproducto agroindustrial abundante en diversas regiones de México, que, dada su porosidad y bajo peso específico, se sugiere su uso como sustrato. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del tamaño de partícula de la cáscara de cacahuete y su combinación con turba, en el desarrollo y producción del cultivo de chile habanero. Los tratamientos estudiados consistieron en partículas menor de 3 mm, mayor de 3 mm, una mezcla de partículas mayor de 3mm con Peat moss en proporción 1:1 (v/v), además de una combinación de Peat moss y vermiculita en proporción 1:1 (v/v) como testigo. Mismos a las que se les determinó sus características físicas y químicas, se colocaron en contenedores con capacidad de cinco litros y se establecieron en un invernadero, bajo un diseño completamente al azar, para trasplantar y dejar crecer plantas de chile habanero, a las cuales se les midió la altura y diámetro del tallo y rendimiento y calidad del fruto. Los resultados obtenidos manifiestan que partículas menor de 3 mm o en su defecto mayor de 3 mm mezclado con Peat moss, con características físicas de 77.69-81.68% de porosidad total (Pt), 32.36-36.01% porosidad de aireación (Pai), 42.11-49.32% porosidad de retención de humedad (Prh), 0.09-0.15 g cm⁻³ de densidad aparente (Da), 5.42-5.45 de pH y 0.96-1.39 dS m⁻¹ de conductividad eléctrica (CE), presentan valores en el desarrollo de la planta, rendimiento y calidad del fruto similares al testigo, confirmando su potencial como sustrato.

Palabras clave: Hidroponía, propiedades físicas, rendimiento, subproducto agroindustrial.

ABSTRACT. Peanut shell (*Arachis hypogaea* L.) is an abundant agroindustrial byproduct in various regions of Mexico, which, given its porosity and low specific weight, its use as a substrate is suggested. The objective of this work was to evaluate the effect of the particle size of the peanut shell and its combination with peat, on the development and production of the habanero pepper crop. The treatments studied consisted of particles smaller than 3 mm, larger than 3 mm, a mixture of particles larger than 3 mm with Peat moss in a 1:1 (v/v) proportion, as well as a combination of Peat moss and vermiculite in a 1:1 (v/v) proportion as a control. The same ones whose physical and chemical characteristics were determined, were placed in containers with a capacity of five liters and established in a greenhouse, under a completely random design, to transplant and let habanero pepper plants grow, to which the height and diameter of the stem and yield and quality of the fruit were measured. The results obtained show that particles smaller than 3 mm or, failing that, larger than 3 mm mixed with Peat moss, with physical characteristics of 77.69-81.68% total porosity (Pt), 32.36-36.01% aeration porosity (Pai), 42.11-49.32% moisture retention porosity (Prh), 0.09-0.15 g cm⁻³ of apparent density (Da), 5.42-5.45 pH and 0.96-1.39 dS m⁻¹ electrical conductivity (CE), present values in plant development, yield and fruit quality similar to the control, confirming its potential as a substrate.

Keywords: Hydroponics, physical properties, performance, agroindustrial byproduct.

Como citar: Tucuch-Haas C, Tuz-Can A, Chi-González G, Angulo-Castro A, Tucuch-Haas I (2026) Cáscara de cacahuete (*Arachis Hypogaea* L.) como sustrato para la producción de chile habanero. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 13(1): e4709. DOI: 10.19136/era.a13n1.4709.

INTRODUCCIÓN

Dentro de los sistemas de producción en hidroponía, el sustrato juega un papel determinante en el desarrollo de las plantas (Maucieri *et al.* 2019), ya que es el responsable de proporcionar soporte a la planta, retener y suministrar humedad y nutrientes en niveles adecuados para las plantas, el cual puede ser de síntesis natural u orgánico (Faizah *et al.* 2020). Existe una gran variedad de sustratos que han sido propuestos para la producción de cultivos sin suelo (Asaduzzaman *et al.* 2015, Maucieri *et al.* 2019), en la que destacan por su mayor uso la roca volcánica, lana de roca, polvo y fibra de coco, turba, perlita y vermiculita (Kim *et al.* 2021, Mushtaq 2021), sin embargo, la gran mayoría tiene el inconveniente de no estar disponibles de manera fácil, económica y local para los usuarios (Patil *et al.* 2020), lo que implica su importación y conlleva a un incremento adicional a su costo de producción, con un impacto económico significativo para el productor (Cruz-Crespo *et al.* 2012). Además, en casos particulares, como la turba, sustrato empleado para la elaboración de almácigos a nivel mundial, su incremento en el precio por ser un producto importado (Aguilera-Rodríguez *et al.* 2021), así como los daños de tipo ecológico y ambiental por su extracción masiva y sin control (Gruda *et al.* 2019), ocasiona que se generen sustratos alternativos. Entre otros ejemplos de contaminación se puede mencionar la lana de roca, empleado para la producción de plantas en macetas, elaborado de material no biodegradable (Nerlich y Dannehl 2021). Los inconvenientes antes planteados, respecto a los sustratos comerciales, dan la pauta para explorar nuevos materiales que cumplan con las exigencias de los cultivos, que sean sustentables, disponibles en el área de interés y que sea de nulo a bajo costo, en particular para la producción de chile habanero en el estado de Yucatán, tal como se ha realizado en otros estados como es el caso de Chiapas (Reyes-Reyes *et al.* 2024)

La industria del cacahuete es una de las principales generadoras de subproductos agroindustriales, dado que se estima que entre el 30 al 35% del peso total del fruto es cáscara (Jiménez *et al.* 2019). A nivel nacional en México se siembra alrededor de 61 187 ha con una producción total de 102 778 t de producto; de las cuales Yucatán contribuye con un volumen de 287 t (SIAP-SIACOM 2025). Entre los usos que se han reportado se encuentra el empleo como alimento para rumiantes, combustible, abono orgánico y cama para gallineros de las aves (Guerrero-Colin *et al.* 2016). Por lo que la información es escasa respecto a su uso como sustrato para la producción de plantas en sistemas hidropónicos, razón por la cual se plantea la presente investigación empleando un cultivo emblemático en la región sur de México.

Yucatán es considerado una de las principales zonas productoras de chile habanero en México, lo que le ha valido su denominación de origen, potenciando su valor en el mercado y fomentando el desarrollo de nuevas variedades (Avilés-Baeza *et al.* 2021). Pero ocupa el segundo lugar en producción a nivel nacional, solo por debajo de Sinaloa (SIAP-SIACOM 2025), debido a la tecnología empleada. Yucatán, por lo general presenta un sistema de producción a campo abierto, cuyos rendimientos fluctúan de 15 a 30 t ha⁻¹, dependiendo de la tecnología empleada; mientras que, bajo sistemas protegidos, se reporta hasta 43 toneladas ha⁻¹ (Ramírez *et al.* 2018). De acuerdo con Meneses y Garruña (2020) con base a una revisión bibliográfica de la información existente respecto a este cultivo, sugieren que aún falta enfocar la investigación a resolver las problemáticas para el control de plagas y prácticas agrícolas sustentables. Bajo esta premisa, se puede destacar el

bajo conocimiento en la producción en sistemas protegidos, en particular de los sustratos empleados, razón por la cual se planteó la presente investigación con el objetivo de proporcionar una alternativa de sustrato de bajo costo, sin daños al ambiente y de gran disponibilidad en la región, partiendo de la idea de que la cáscara de cacahuete como subproducto de la agroindustria, presenta potencial para ser empleado como sustrato dado su estructura porosa y su bajo peso específico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento

La investigación se llevó a cabo, bajo condiciones controladas, en un invernadero tipo túnel de 600 m² del Instituto Tecnológico Superior del Sur del Estado de Yucatán, ubicado en el municipio de Oxkutzcab, Yucatán México, a 20°17'22.2" LN 89°23'22.2" LO.

Recolecta y preparación de la mezcla de sustratos

La cáscara de cacahuete se recolectó en fresco en el municipio de Opichén, Yucatán, México, ubicado a 20°33'13.8" LN 89°51'33.8" LO, misma que se expuso al sol durante una semana a temperatura ambiente (28 °C), para eliminar humedad y evitar el desarrollo de patógenos. Posterior al secado, una parte del material se trituró, mediante un molino convencional, y tamizó, con un cernidor metálico, para la obtención de partículas menores de 3 mm.

Tratamientos

Los tratamientos quedaron conformados de la siguiente manera T1 (CCG): cáscara de cacahuete sin moler con partículas mayores de 3 mm, T2 (PM-CCG): mezcla 1:1 (V/V) cáscara de cacahuete sin moler y Peat moss, T3 (CCM): cáscara de cacahuete molida con partículas menores de 3 mm y T4 (PM-VM): combinación 1:1 (V/V) Peat Moss-Vermiculita como testigo.

Caracterización física y química de las mezclas de sustratos

Las características físicas, de cada mezcla, se determinaron mediante los principios de la metodología sugerida por Ferrerazi *et al.* (2024) y adaptada a las necesidades del experimento, que consistió en la saturación (hasta observar un espejo de agua sobre la superficie) de 250 g de muestra, durante 60 min con agua destilada, misma que se distribuyó en tres vasos de unicel (236.5 mL y 2 g de peso), para la obtención del peso promedio saturado y el drenado, esta última, después de realizar tres agujeros en la parte inferior del vaso y deja fluir el gua contenida durante 30 min. Para posteriormente, la muestra húmeda, secarlo en una estufa con sistema de circulación de aire forzada (Marca: Mermert™, Modelo: UF30) a 70 °C durante 72 h. Con los valores de peso seco (PSS), saturado (Pss) y drenado (Psd) del sustrato se calcularon los siguientes parámetros:

Volumen total de poros (V_{tp}) = $P_{ss} - PSS$

Volumen de poros de aireación (V_{ai}) = $P_{ss} - P_{sd}$

Densidad aparente (D_a) = PSS/V_v (volumen del vaso)

Porosidad total (% P_t) = $(V_{tp}/V_v) \cdot 100$

Porosidad de aireación (% Pai) = $(V_{ai}/V_v) \times 100$

Porosidad de retención de humedad (%Prh) = %Pt-%Pai

Para la determinación del pH y la CE, parámetros químicos, se utilizó el agua drenada y recolectada de la saturación de los sustratos para las pruebas físicas, con la ayuda de un medidor de pH y CE digital portátil (Marca: HANNA, Modelo: HI98130).

Establecimiento de las plantas

Para determinar la pertinencia de los materiales como sustrato, se utilizaron plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jaq.) variedad Mayapán, germinadas y trasplantadas a los 45 días después de la siembra (dds) en bolsas negras de polietileno con capacidad de 5.0 L, previamente perforadas en la parte inferior para permitir el drenaje del exceso de agua. Dichas bolsas con las mezclas de sustratos y las plantas se distribuyeron dentro del invernadero bajo un diseño completamente al azar, empleando 10 repeticiones por mezcla, acomodadas a una distancia de 50 cm entre planta y 80 cm entre hileras. Es preciso destacar que se colocó una planta por contenedor, mismas que se condujeron a tres ramas (seleccionadas con base a su desarrollo y vigor), con la ayuda de hilos de rafia, como tutores, colocados de la base del tallo principal, hasta los alambres de soporte que se encontraban en la parte superior del invernadero; por lo que, a manera de poda, se eliminaron brotes laterales excedentes del tallo principal y de las ramas seleccionadas.

Riego y fertilización

Dos días después del trasplante (ddt) se iniciaron los riegos de forma manual, todos los días, con el apoyo de un recipiente graduado. La cantidad de agua suministrada estuvo en función de la etapa fenológica del cultivo, de tal manera que los primeros 20 ddt se aplicó 500 mL planta⁻¹, distribuidos en tres riegos (8:00 am, 10:00 am y 12 pm); a partir de los 21 días y hasta los 78 ddt se proporcionó 1 L planta⁻¹ y de los 79 ddt en adelante 2.0 L planta⁻¹, racionados en cuatro aplicaciones (8:00 am, 10:00 am, 12:00 pm y 14:00 pm). La fertilización se llevó a cabo cada tercer día, en conjunto con el riego, y consistió en una mezcla de 9.0 g de urea (46% N, 0% P₂O₅ y 0% K₂O) ; 12.0 g de kimfol-S® (20% N, 30% P₂O₅ y 10% K₂O, 1% Ca, 1% Mg, 0.1% Fe, 0.1% B, 0.1% Cu, 0.1% Mn, 0.1% Zn, 0.01% Mo y 0.1% Co) y 16.0 g de Ultrasol® NKS (12% N, 0% P₂O₅ y 46% K₂O) y 7.0 g de sulfato de magnesio (27% MgO y 20% S), todo diluido en 20 L de agua.

Variables medidas

Se determinó el número y peso total de frutos por planta, como parte del rendimiento, que se realizó al momento de la cosecha a los 85, 90 y 105 ddt, sin embargo, para una mejor interpretación de los resultados, los datos de las tres cosechas se analizaron en conjunto. Para el número de frutos por planta, se contabilizó los frutos cosechados por planta en cada corte, para posteriormente sumarlos; mientras que para el peso total de frutos por planta se pesó el total de frutos por corte, con la ayuda de una báscula digital (Marca: OHAUS, Modelo: H-8109) y finalmente sumarlos. Por otro lado, para la calidad se seleccionaron 15 frutos al azar por tratamiento y repetición, mismas a las que se les determinó el peso con la ayuda de una báscula digital y el diámetro ecuatorial y meridional, mediante un vernier digital (Marca: Keatronic, Modelo: A150).

A los 105 ddt se recabó la altura de las plantas, con la ayuda de un flexómetro (Marca: Stanley, Modelo: STHT36049-848) tomada de la base del tallo, hasta el ápice terminal de la planta; el diámetro del tallo, tomado a 2.0 cm por encima del cuello de la raíz, para evitar la zona de ensanchamiento en la transición raíz-tallo (Tomlinson 1999), con un vernier digital; la longitud y peso fresco de la raíz, para la cual fue necesario retirarla de la bolsa y lavarla cuidadosamente con agua, para posteriormente medirla con un flexómetro, desde la base del tallo, hasta el ápice terminal de la raíz principal y pesarla con una balanza analítica; por último, se determinó la biomasa fresca total, a través del pesado de la planta completa.

Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar, con tres tratamientos más un testigo, 10 réplicas por grupo y una planta como unidad experimental. A los datos recabados se les aplicó las pruebas de Shapiro-Wilk para cumplir con la normalidad y de Levene para la homogeneidad. Posteriormente fueron analizados mediante el análisis de varianza y cuando se detectaron diferencias estadísticas se realizó la comparación de medias por el método Tukey ($p \leq 0.05$) con el paquete estadístico SAS (SAS 2004).

RESULTADOS

Características físicas y químicas de los sustratos

En particular para los tratamientos (Tabla 1), se aprecia una variación en la porosidad total por efecto del tamaño de las partículas, donde la CCG (mayor de 3 mm) mostró un 2.8% respecto al CCM (menor de 3 mm) y 6.8% para la combinación PM-CCG. Para el control, solo CCM fue similar, mientras que PM-CCG presentó un valor inferior de 3.1% y CCG fue superado en un 3.1%. Respecto a la porosidad de aireación (Pai) la CCG indicó un valor por encima del control y del resto de los tratamientos con diferencias de 52% para el control, 36% para CCM y 34% para PM-CCG; por el contrario, para la porosidad de retención humedad (Prh) la CCG presentó el valor más bajo, con 46% comparado con el control y 13 y 20% respectivamente para CCM y PM-CCG, por lo que es preciso destacar que, entre estas mismas variables, hay una estrecha relación inversa entre sí, el cual, está relacionado con su tamaño de partícula.

Tabla 1. Características físicas y químicas de los sustratos empleados para la producción de *Capsicum chinense* Jacq.

Trat	Pt	Pai	Prh	Da	pH	CE
	-----%-----			g cm ⁻³		dS m ⁻¹
PM-VC	81.38	18.38	63.00	0.14	6.06	1.16
CCM	81.68	32.36	49.32	0.15	5.45	1.39
PM-CCG	77.69	36.01	42.11	0.09	5.42	0.96
CCG	84.48	70.82	13.65	0.06	5.44	0.81

Pt = Porosidad total; Pai = Porosidad de aireación; Prh = Porosidad de retención de humedad; Da = Densidad aparente, pH = potencial de hidrógeno y CE = Conductividad eléctrica. PM-VC = Peat moss-Vermiculita; CCM = Cáscara de cacahuete molido; CCG = Cáscara de cacahuete sin moler; PM-CCG = Peat moss-cáscara de cacahuete sin moler. Cada valor es el promedio de tres replicas.

Los valores de la densidad aparente (D_a), estuvieron en función del tamaño de la partícula y su proporción, de tal manera, que CCG señaló una diferencia muy marcada respecto al testigo y los tratamientos. Respecto al testigo la diferencia encontrada fue de 57.2%, seguido de PM-CCG con 35.8%; no así para CCM que estuvo ligeramente por encima con 7.1%. Por otra parte, respecto a las variables químicas, los valores de pH todos los tratamientos estuvieron cercano a un grado de diferencia por debajo del control; no así, para CE en la que CCM estuvo 0.23 dS m^{-1} por encima del testigo y 0.18 y 0.35 dS m^{-1} respectivamente para PM-CCG y CCG, por debajo comparado con el testigo.

Respuesta del sustrato en el desarrollo de la planta

En la Tabla 2 se muestra el comportamiento del desarrollo de las plantas por efecto de los materiales empleados como sustrato. Para la variable altura, los tratamientos PM-CCG y CCM, con valores de 1.43 y 1.20 cm respectivamente, fueron estadísticamente iguales ($p = 0.05$) al control, aunque, el valor de PM-CCG estuvo 2.8% por encima del control; mientras que CCG fue estadísticamente diferente al control y al tratamiento PM-CCG, cuya altura fue de 1.04 cm, valor que estuvo por debajo de estas. Para el diámetro del tallo, solo CCG-PM fue estadísticamente similar ($p=0.05$) al control, a pesar de un ligero valor de 0.77 mm por debajo de esta; mientras que el resto de los tratamientos fueron estadísticamente diferentes ($p = 0.05$) e inferiores al control con valores de diferencias de 3.8 y 6.97 mm respectivamente para CCM y CCG. Respecto a la longitud de la raíz, no se observó diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos ($p = 0.05$) y el control, esto como consecuencia del confinamiento de las raíces por el contenedor. Para el peso de la raíz y la biomasa fresca total, solo PM-CCG fue estadísticamente similar ($p = 0.05$) al control, mientras que el resto presentaron valores muy alejados, con diferencias de 88.91 y 104.82 mm respectivamente para CCM y CCG. Esta misma tendencia de comportamiento se observó para la biomasa donde PM-CCG fue similar al control y CCM y CCG fueron estadísticamente diferentes ($p = 0.05$) al control e incluso al PM-CCG.

Tabla 2. Respuesta en la altura, diámetro del tallo, longitud de raíz, peso de la raíz y biomasa total, de plantas de chile habanero Var. Mayapan por efecto del sustrato, evaluado a los 105 ddt.

Trat	AP (m)	DT (mm)	LR (cm)	PR (g)	BT (g)
PM-VC	1.39 ^a	19.23 ^a	43.00 ^a	176.22 ^a	721.54 ^a
CCM	1.20 ^{ab}	15.38 ^b	43.50 ^a	87.30 ^{bc}	388.90 ^b
PM-CCG	1.43 ^a	18.52 ^a	44.60 ^a	140.40 ^{ab}	644.50 ^a
CCG	1.04 ^b	12.26 ^c	42.00 ^a	71.40 ^c	230.58 ^c

AP = Altura de la planta; DT = Diámetro del tallo; LR = Longitud raíz; PR = Peso de la raíz; BT = Biomasa total.
PM-VC = Peat moss-Vermiculita; CCM = Cáscara de cacahuete molido; CCG = Cáscara de cacahuete sin moler;
PM-CCG = Peat moss-cáscara de cacahuete sin moler. Cada punto es la media de 10 repeticiones evaluado a los 105 ddt. Barras con la misma letra son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $p \leq 0.05$.

Repuesta en el rendimiento y calidad del fruto

La respuesta del número de frutos, por acción de los sustratos evaluados, se presentan en la Figura 1A, donde es evidente que, a excepción de CCG, que fue estadísticamente diferente al control ($p = 0.05$) con un 56.1% por debajo de esta, el resto de los tratamientos fueron estadísticamente iguales ($p = 0.05$). Una misma tendencia de comportamiento se observó para el rendimiento total de fruto

(Figura 1B) expresada en peso, en donde CCG mostró un 62.6% de rendimiento por debajo del control. La comparación entre tratamientos, señala que CCM y PM-CCG son estadísticamente similares ($p = 0.05$) tanto en número como en peso total de frutos por planta, no así la CCG que difiere estadísticamente en un 55.6 y 61.8% por debajo de CCM y 52.4 y 58.8% para PM-CCG, respectivamente para el número y peso de frutos por planta. Este comportamiento sugiere que la cáscara de cacahuete con partículas por encima de 3 mm, no es una buena opción para su uso como sustrato, para producción de plantas en contenedores, cuando no se combina con otros materiales.

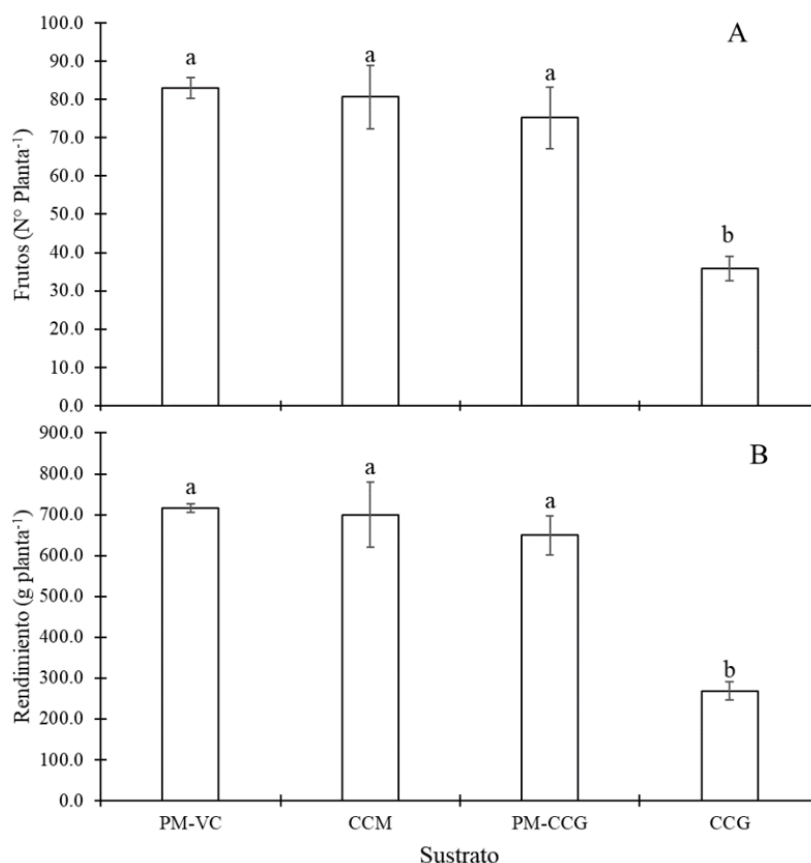


Figura 1. Respuesta en el número (A) y peso (B) total de frutos por planta, de tres cortes, en el cultivo de chile habanero por efecto del sustrato. Cada punto es la media de 10 repeticiones $\pm$ error estándar. Barras con la misma letra son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $p \leq 0.05$. PM-VC = Peat moss-Vermiculita; CCM = Cáscara de cacahuete molido; CCG= Cáscara de cacahuete sin moler; PM-CCG = Peat moss-cáscara de cacahuete sin moler.

Respecto a la longitud, diámetro y peso del fruto (Figura 2 a, b y c), los datos obtenidos indican que CCM y PM-CCG, son estadísticamente similares a la del control ($p = 0.05$), no así CCG ($p = 0.05$), en la que su diámetro y peso fueron inferiores al de los tratamientos y el control, indicando una diferencia estadísticamente significativa ($p = 0.05$) con el control y el resto de los tratamientos. Respecto al control la CCG indicó una diferencia por debajo de 0.16 cm y 1.52 g para el diámetro y el peso respectivamente; mientras que, comparado con la CCM, que mostró los valores más altos

(2.8 cm para el diámetro y 11.1 g para el peso) de los tratamientos, la diferencia fue de 0.16 cm para el diámetro y 2.10 g para peso.

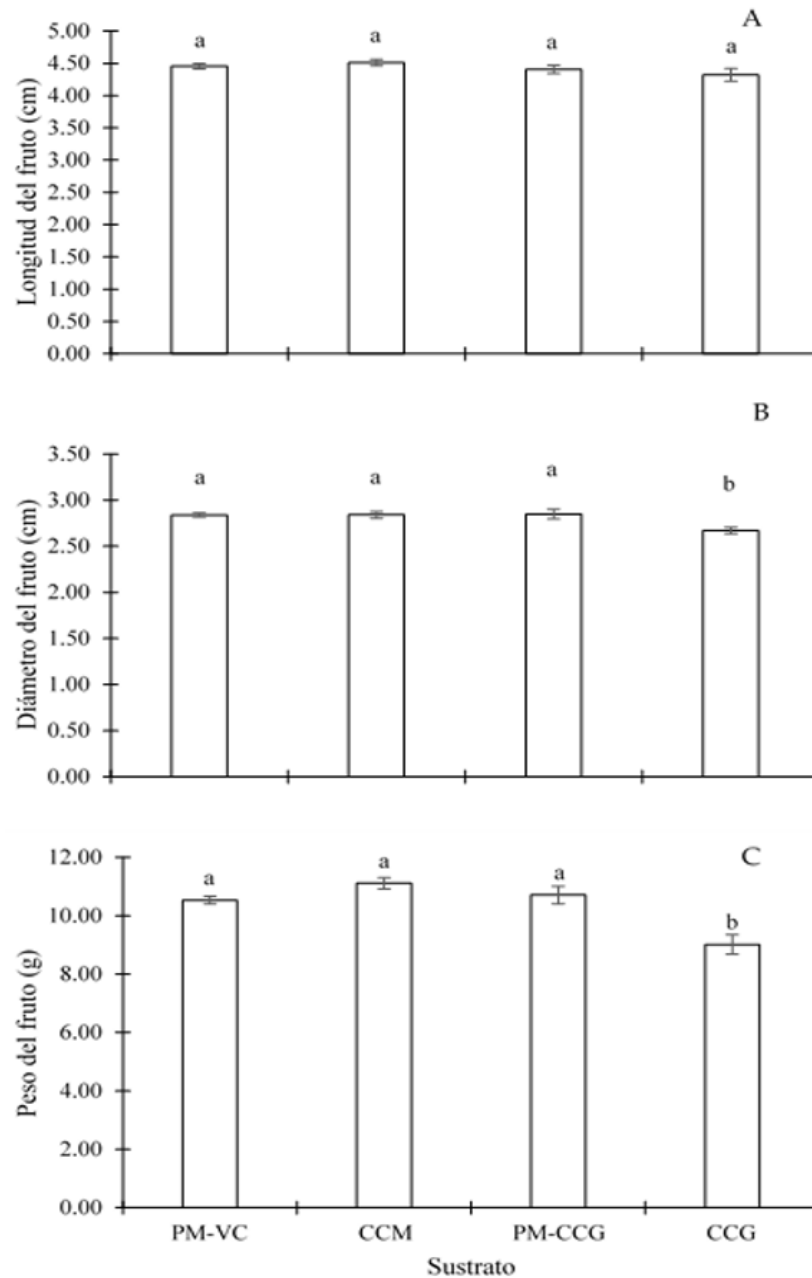


Figura 2. Respuesta en la longitud (A), diámetro (B) y peso (C) del fruto, en el cultivo de chile habanero por efecto del sustrato. Cada punto es la media de 10 repeticiones $\pm$ error estándar. Barras con la misma letra son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $p \leq 0.05$. PM-VC = Peat moss-Vermiculita; CCM = Cáscara de cacahuete molido; CCG = Cáscara de cacahuete sin moler; PM-CCG = Peat moss-cáscara de cacahuete sin moler.

DISCUSIÓN

Características físicas y químicas de los sustratos

La variación en los valores de la porosidad total de los tratamientos, apoya la sugerencia de Gutiérrez-Castorena *et al.* (2011), de que esta variable está en función del acomodo de las partículas y la naturaleza de su microestructura interna. Por lo general, se espera que partículas de mayor tamaño, en un sustrato, generen una menor porosidad (Olarte y Ruge 2020), lo que no ocurrió en el presente estudio, puesto que el tratamiento con cáscara de cacahuete mayor de 3 mm presentó el valor más alto, respecto al resto de los tratamientos mezclados o solo con partículas menor de 3 mm, lo que se explica como consecuencia de la microestructura interna del material, conformado por pequeñas laminas o escamas sobrepuestas entre sí (Bobet *et al.* 2020) y sus bordes esféricos con un gran número de cavidades (Toledo-Jaldín *et al.* 2023), que permitieron una mayor porosidad; en contraste, la baja porosidad al mezclarse con peat moss, se debió al alojamiento de las partículas de la turba entre los espacios inter e intra particulares de la cáscara de cacahuete, ya que de acuerdo con Ruvalcaba-Barrios *et al.* (2024) la turba presenta hasta un 72.6% de partículas menores de 2 mm, comportamiento que puede ser corroborado con los valores de la densidad aparente, que señala 0.09 g cm^{-3} para PM-CCG y 0.6 g cm^{-3} para solo CCG; mientras que el valor ligeramente por debajo con partículas menor de 3 mm con CCM, es también consecuencia de la dinámica de acomodo de las partículas, solo que en menor grado, debido a la irregularidad en la proporción del tamaño de las partículas que lo conformaron.

El comportamiento de la relación agua-aire (Tabla 1), coincide con los resultados encontrados para otros materiales orgánicos tales como aserrín de pino, fibra de coco y sargazo (Gayosso-Rodríguez *et al.* 2018), y de igual forma con lo señalado por Mixquititla-Casbis *et al.* (2022), para una variedad de materiales comerciales, quienes sugieren que sustratos con partículas mayores o iguales a 2 mm presentan una mayor aireación a expensas de la retención de humedad y propone que el tamaño de partícula afecta directamente la relación agua-aire en los sustratos, debido a la dominancia de los macroporos, sobre los microporos responsables de la retención de humedad (Schafer y Lerner 2022), y apoya la idea de Gutiérrez-Castorena *et al.* (2011) quienes indican que la mezcla de materiales, pueden equilibrar la relación macro y micro poros, con la cual se obtiene una percolación y retención de humedad óptima que favorece el desarrollo de las plantas, idea que puede corroborarse con los estudios de Osorio-Espinoza *et al.* (2025) quienes concluyen que la mezcla de distintos materiales favoreció el desarrollo de las especies en estudio.

En relación a los parámetros químicos Schafer y Lerner (2022) proponen valores ideales de pH de 5.5 a 6.5 y de CE 0.36 a 0.65 dS m^{-1} , por lo que, para el caso del pH, solo el PM-VC estuvo dentro del rango ideal, mientras que todos los tratamientos quedaron ligeramente por debajo; por el contrario, para la CE todos los tratamientos, incluyendo al PM-VC, estuvieron por encima de lo que se considera ideal. Sin embargo, tanto el pH y CE fueron controlados mediante el suministro de la solución nutritiva y lavados al sustrato, cuidando de que quedarán dentro del rango de tolerancia de las plantas.

Respuesta del sustrato en el desarrollo de la planta

En relación al crecimiento y desarrollo de las plantas (Tabla 2), si bien la cáscara de cacahuete tiene potencial para permitir el desarrollo de las plantas, sus partículas no deben ser mayor de 3.0 mm, que de acuerdo con Anicua *et al.* (2009) y Urrestarazu (2004), tamaños de partículas por debajo de ese valor, predomina una mayor proporción de poros de entre 30 a 300 μm responsables de la retención de agua disponible; o de lo contrario, debe ser mezclado con sustratos de menor tamaño de partículas como la turba, que incrementen su capacidad de retención de humedad, con lo cual se evita el uso de un solo material que ponga en riegos los ecosistemas o incrementen los costos de producción (Castro *et al.* 2019, Gruda *et al.* 2019).

La variación del comportamiento en el desarrollo de las plantas, determinadas mediante la altura, longitud y peso de la raíz, por efecto de la cáscara molida, sin moler o mezclada, donde esta última (PM-CCG), en conjunto con el control (PM-VC) fueron mejores, se explica como respuesta al equilibrio en el ambiente poroso (macroporos y microporos) creadas por las partículas de los materiales de menor tamaño contenido en las mezclas, dado que como señala Lucas *et al.* (2022) la presencia de macroporos facilita la penetración de las raíces y el movimiento del agua, mientras que los poros más pequeños retienen la humedad y los nutrientes, dinámica que de acuerdo con Sasse *et al.* (2019) y Zhang *et al.* (2023) influyen en el peso de la raíz y esta a su vez impactan en la altura de la planta (Cabeza y Claassen 2017), esto como consecuencia en la disponibilidad de agua y nutrientes y consecuentemente su absorción (Pire y Pereira 2018, Castiglione *et al.* 2023).

Repuesta en el rendimiento y calidad del fruto

Por otro lado, las variables de respuesta del rendimiento, que se observó entre CCM y PM-CCG, donde esta última, a pesar de presentar una mayor altura y biomasa, no mostró el valor más alto en rendimiento, sugiere que no siguen un patrón de comportamiento ligado de manera directa al sustrato, más bien estuvo en función de su fisiología, en la cual plantas más grandes presentan dificultades para distribuir sus nutrientes y la energía para la producción de frutos (Javet *et al.* 2024). Los valores tanto en el número de fruto y peso total de frutos por planta, en particular para los individuos cultivados en la CCM y PM-CCG, son superiores al valor máximo reportado por Tucuch-Haas *et al.* (2012), para una especie criolla, cuando son crecidas en roca volcánica con diferentes granulometrías combinados con fibra de coco y también en perlita (Urrea-López *et al.* 2014), sin embargo, son similares a lo reportado por Tapia-Vargas *et al.* (2016), para una variedad de habanero negro y López-Gómez *et al.* (2020), para la variedad Jaguar, quienes sugieren rendimientos que oscilan de 400 a 600 g planta⁻¹ cuando se producen este cultivo bajo invernadero y sistemas hidropónicos con roca volcánica como sustrato. También es preciso destacar, que estos valores son ligeramente superiores a la media de producción estimada para diferentes poblaciones en campo que fue de 591.6 g planta⁻¹ (Latournerie-Moreno *et al.* 2015). Esta respuesta permite evidenciar su potencial uso en la producción de este cultivo con valores superiores y similares a otros materiales empleados como sustrato.

Bajo este mismo contexto, los valores obtenidos de longitud, diámetro y peso del fruto, como indicadores de la calidad del fruto, son superiores, que cuando se emplea tezontle (roca volcánica) como sustrato con diferentes regímenes de humedad, cuyos valores oscilaron, entre 2.41 cm a 3.48 cm de longitud, 1.93 cm a 2.29 cm de diámetro y 2.15 g a 3.45 g de peso (López-Gómez *et al.* 2017);

o cuando se emplean arena de río y su combinación con otros materiales, cuyos valores máximos fueron de 3.5 cm de longitud, 2.5 cm de diámetro y 7.8 g de peso del fruto (Javier-López *et al.* 2022); sin embargo son similares a lo reportado por Meneses-Lozano *et al.* (2020), quienes señalaron valores de 4.0 cm, 2.9 cm y 8.0 g de longitud, diámetro y peso respectivamente, con tezontle y una solución nutritiva Steiner.

CONCLUSIONES

La cáscara de cacahuete es un material regional con potencial de uso como sustrato, para la producción de chile habanero en hidroponía, cuya microestructura y tamaño de partícula condicionan la capacidad de retención humedad y de aire. Tamaño de partículas menores de 3.0 mm o en su defecto mayores de 3mm pero combinado con peat moss, presentan valores de rendimiento de fruto similar a los sustratos comerciales sin comprometer la calidad.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia

LITERATURA CITADA

- Aguilera-Rodríguez M, Aldrete A, Trejo-Téllez L, Ordaz-Chaparro VM (2021) Sustratos con aserrín de coníferas y latifoliadas para producir planta de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. Agrociencia 55: 719-732
- Anicua R, Gutiérrez CMC, Sánchez GP, Ortiz SC, Volke HVH, Rubiños PJE (2009) Tamaño de partícula y relación micromorfológica en propiedades físicas de perlita y zeolita. Agricultura Técnica en México 35(2): 147-156.
- Asaduzzaman Md, Saifullah Md, Mollick SR, Hossain Md, Halim HMA, Asao T (2015) Influence of soilless culture substrate on improvement of yield and produce quality of horticultural crops. In: Asaduzzaman Md (ed) Soilless culture - use of substrates for the production of quality horticultural crops. Intech open Londres, Inglaterra. pp: 1-31.
- Aviles-Baeza WI, Lozano-Contreras MG, Ramírez-Silva JH (2021) Evaluation of habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) varieties under shade house conditions in Yucatan, Mexico. Open Access Library Journal 8(06): e7515. <https://doi.org/10.4236/OALIB.1107515>
- Bobet O, Nassio S, Seynou M, Remy B, Zerbo L, Sanou I, Sawadogo M, Millogo Y, Gilleset E (2020) Characterization of peanut shells for their valorization in earth brick. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering 8(4): 301-315. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2020.84018>
- Cabeza RA, Claassen N (2017) Sistemas radicales de cultivos: extensión, distribución y crecimiento. Agro Sur 45(2): 31-45
- Castiglione MR, Bottega S, Sorce C, Spanó C (2023) Effects of zinc oxide particles with different sizes on root development in *Oryza sativa*. Rice Science 30(5): 449-458 <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.03.016>
- Castro GSL, Aldrete A, López UJ, Ordaz CVM (2019) Caracterización física y química de sustratos con base en corteza y aserrín de pino. Madera y Bosques 25(2): 1-10.

- Cruz-Crespo E, Can-Chulim A, Sandoval-Villa M, Bugarín-Montoya R, Robles-Bermúdez A, Juárez-López P (2012). Sustratos en la horticultura. *Revista Biociencias* 2(2): 17-26.
- Faizah H, Fawaidah I, Millah N, Fadhillah N, Ma'arif M (2020) Effect of various substrates in non-circulating hydroponic systems and soil media on the growth of *Gynura procumbens*. *Jurnal Biosains* 6(3):103-108. <https://doi.org/10.24114/jbio.v6i3.20101>
- Ferrarezi RS, Qin K, Nguyen LX, Poople SD, Cardenas-Gallegos JS, De Olivera HFE, Housley MJ (2024) Multi-season evaluation of substrates for optimized arugula and lettuce production in hydroponics. *HortScience* 59(3): 403-411. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI17606-23>
- Gayosso-Rodríguez S, Borges-Gómez L, Villanueva-Couoh E, Estrada-Botello MA, Garruña R (2018) Caracterización física y química de materiales orgánicos para sustratos agrícolas. *Agrociencia* 52: 639-652.
- Gruda N, Bisbis M, Tanny J (2019) Influence of climate change on protected cultivation: Impacts and sustainable adaptation strategies - A review. *Journal of Cleaner Production* 225: 481-495. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.210>
- Guerrero-Colín J, Trejo-Márquez M, Moreno-Lara J, Lira-Vargas A, Pascual-Bustamante S (2016) Extracción de fibra de los desechos agroindustriales de cacahuete, para su aplicación en el desarrollo de alimentos. *Agrociencias* 1(2): 806-812.
- Gutiérrez-Castorena MC, Hernández EJ, Ortiz-Solorio CA, Anicua SR, Hernández LME (2011) Relación porosidad-retención de humedad en mezclas de sustratos y su efecto sobre variables respuesta en plántulas de lechuga. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 17(3): 183-196.
- Javed H, Naeem A, Shaukat S, Makhdoom M, Ghafoor I, Shahzada N, Hussain F, Tipu A, Imran M, Rehman A, Majeed T, Akber A (2024) Exploring the relationship between plant height and yield-contributing attributes of wheat in drought conditions. *Biological and Clinical Sciences Research Journal* 2024: 854. <https://doi.org/10.54112/bcsrj.v2024i1.854>
- Javier-López L, Palacios-Torres RE, Ramírez-Seañez AR, Hernández-Hernández H, Antonio-Luis MC, Yam-Tzec JA, Chaires-Grijalva MP (2022) Producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en lombricomposta con fertilización orgánica. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9(3): e3348. <https://doi.org/10.19136/era.a9n3.3348>
- Jiménez PV, Agostinho DaSD, Umlandt M, Gatani M, Medin JC (2019) Caracterización de cáscara de maní procedente de la provincia de Córdoba, Argentina. *Revista Argentina de Ingeniería* 7(13): 71-78.
- Kim JK, Shawon MRA, An JH, Yun YJ, Park SJ, Na JK, Choi KY (2021) Influence of substrate composition and container size on the growth of tissue culture propagated apple rootstock plants. *Agronomy* 11: 2450. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122450>.
- Latournerie-Moreno L, Lopez-Vázquez JS, Castañón-Nájera G, Mijangos-Cortes JO, Espadas-Villamil G, Pérez-Gutiérrez A, Ruiz-Sánchez E (2015) Evaluación agronómica de germoplasma de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Agroproductividad* 18(1): 24-29.
- López-Gómez JD, Sotelo-Nava H, Villegas-Torres OG, Andrade-Rodríguez M (2020) Rendimiento y calidad del chile habanero en respuesta a la poda de conducción y régimen nutrimental. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2(2): 315-325.
- López-Gómez JD, Villegas-Torres OG, Sotelo-Nava H, Andrade-Rodríguez M, Juárez-López P, Martínez-Fernández E (2017) Rendimiento y calidad del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq) por efecto del régimen nutrimental. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8(8): 1747-1758.
- Lucas M, Nguyen L, Guber A, Kravchenko A (2022) Cover crop influence on pore size distribution and biopore dynamics: Enumerating root and soil faunal effects. *Frontiers in Plant Science* 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.928569>

- Maucieri C, Nicoletto C, Van Os E, Anseeuw D, Van Havermaet R, Junge R (2019) Hydroponic technologies. In: Goddek S, Joyce A, Kotzen B, Buernell G (eds) Aquaponics food production systems. Springer. Gewerbestrasse, Switzerland. pp. 77-110. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_4
- Meneses LRE, Garruña R (2020) El cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* J.) como modelo de estudio en México. Tropical and Subtropical Agroecosystems 23(21): 1-17
- Meneses-Lozano RE, May-Lugo S, Villanueva-Couoh E, Medina-Dzul K, Echevarría-Machado I, Garruña R (2020) Phenology and quality of habanero pepper fruits (*Capsicum chinense* Jacq.) due to nutrient solution in hydroponics. Agroproductividad 13(9): 33-38. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1673>
- Mixquititla-Casbis G, Villegas-Torres OG, Andrade-Rodríguez M, Sotelo-Nava H (2022) Propiedades físicas y químicas de sustratos en función de su granulometría y componente orgánico-mineral. Acta Agrícola y Pecuaria. 8: e0081007. <https://doi.org/10.30973/aap/2022.8.0081007>
- Mushtaq S (2021) Hydroponics-plant without soil. Just Agriculture 2(2): 1-6.
- Nerlich A, Dannehl D (2021) Soilless cultivation: Dynamically changing chemical properties and physical conditions of organic substrates influence the plant phenotype of lettuce. Frontiers in Plant Science 11: 601455. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.601455>
- Osorio-Espinoza H, Marroquín-Agreda FJ, Falcón-Oconor E, Toledo-Toledo E, Barrera-Rodríguez E, Lerma-Molina JN (2025) Organic substrates improve the quality of *Swietenia mahagoni* (L.) Jacq. under nursery conditions). AgroProductividad 18(8): 15-24. <https://doi.org/10.32854/mdw8pb92>
- Olarte MC, Ruge CJC (2020) Analysis of the relationship between the water retention curve, particle size and pore size distribution in the characterization of a collapsible porous clay. Journal of Ingenierin Science 25(1): 33-43. <https://doi.org/10.22463/0122820X.2403>
- Patil ST, Kadam US, Mane MS, Mahale DM, Dekhale JS (2020) Hydroponic Growth Media (Substrate): A Review. International Research Journal of pure and applied Chemistri 21(23): 106-113. <https://doi.org/10.9734/irjpac/2020/v21i2330307>
- Pire R, Pereira A (2018) Tamaño de los poros del suelo y crecimiento de raíz y vástago de chile Jalapeño (*Capsicum annuum* L.). Agrociencia 52: 685-693.
- Ramírez MM, Arcos CG, Méndez AR (2018) Jaguar: Cultivar de chile habanero para México. Revista Mexicana de Ciencias agrícolas 9(2): 487-492. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V9I2.1089>
- Reyes-Reyes J, Aguirre-Medina JF, Merino A, Marroquín-Morales P (2025) Caracterización fisicoquímica de subproductos agroindustriales tropicales como sustrato para el crecimiento de plantas en vivero. Communications in Soil Science and Plant Analysis 56(19): 2769-2784. <https://doi.org/10.1080/00103624.2025.2526780>
- Ruvalcaba-Barrios JM, Salcedo-Pérez E, Acosta-Sotelo LL, Anzaldo-Hernández J, Ordaz-Chaparro VM, González-Eguarte DR, Rodríguez-Macias R (2024) Propiedades físicas y químicas de sustratos formulados con bagazo de agave y corteza de pino sometidos a explosión con vapor. Biotecnia 26: e2389. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v26.2389>
- Schafer G, Lerner BL (2022) Physical and chemical characteristics and analysis of plant substrate. Ornamental Horticulture 28(2): 181-182.
- SAS (2004) Statistical Analysis System Institute. SAS Proceeding Guide, Version 8.1. SAS Institute. Cary, NC. USA.
- Sasse J, Jordan JS, DeRaad M, Whiting K, Zhalnina K, Northen TR (2019) Root morphology and exudate availability is shaped by particle size and chemistry in Brachypodium distachyon. Plant Direct 4(7): e00207. <https://doi.org/10.1002/pld3.207>
- SIAP-SIACOM (2025) Sistema de información agroalimentaria de consulta: Módulo Agrícola estatal del SIACOM-NG. <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>. Fecha de consulta: 25 de marzo del 2025.

- Tapia-Vargas M, Larios-Guzmán A, Díaz-Sánchez DD, Ramírez-Ojeda G, Hernández-Pérez A, Vidales-Fernández I, Gillén-Andrade H (2016) Producción hidropónica de chile habanero negro (*Capsicum chinense* Jacq). Revista Fitotecnia Mexicana 39(3): 241-245.
- Toledo-Jaldin HP, Blanco-Flores A, Ávila-Márquez DM (2023) Cáscara de cacahuete como material adsovente para la remoción de iones de cobre y fluoruros. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 39: 449-460. <https://doi.org/10.20937/RICA.54633>
- Tomlinson PT (1999) Nursery treatments alter root morphology of 1+0 northern red oak seedlings. In: Stringer JW, Loftis DL (eds) Proceedings, 12th Central Hardwood Forest Conference. Lexington, KY. Gen. Tech. Rep. SRS-24. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 293p
- Tucuch HCJ, Alcántar GG, Ordaz CVM, Santizo RJA, Larqué SA (2012) Producción y calidad de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq) con diferentes relaciones de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ y tamaño de partícula de sustrato. Terra Latinoamericana 30(1): 9-15.
- Urrea-López R, Díaz De La GRI, Valiente-Banuet JI (2014) Effects of Substrate Salinity and Nutrient Levels on Physiological Response, Yield, and Fruit Quality of Habanero Pepper. Hortscience 49(6): 812-818.
- Urrestarazu GM (2004) Tratado del cultivo sin suelo. 3ra edición. Mundi-Prensa. Almería, España. 914p
- Zhang X, Ciantia MO, Knappett J, Leung AK, Liang T (2023) Particle size effects on the axial pull-out and push-in behaviour of roots. Acta Geotechnica 19: 1461-1476. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-01952-y>