

Caracterización física y desempeño hídrico de sustratos orgánicos, inorgánicos y sus combinaciones

Yunier Sosa-Sánchez¹

Juan Enrique Rubiños-Panta^{1,§}

Cándido Mendoza-Pérez¹

Roberto Ascencio-Hernández¹

Julían Delgadillo-Martínez¹

Abdul Khalil-Gardezi¹

1 Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

§Autor para correspondencia: jerpkike@colpos.mx.

Resumen

El uso de un sustrato adecuado es determinante para el éxito de la agricultura protegida. El objetivo de este estudio fue evaluar las propiedades físicas de diversos sustratos y determinar cuáles ofrecen mayor eficiencia hídrica para su aplicación en sistemas agrícolas protegidos. La investigación se llevó a cabo en 2025 en el Laboratorio de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Se analizaron siete sustratos: tezontle, fibra de coco, compost bovino y sus mezclas. Se determinaron la porosidad total, porosidad de aireación, porosidad de retención de agua, densidad aparente, granulometría y capacidad de retención de agua. Asimismo, se cuantificó el agua fácilmente disponible, el agua de reserva y el agua total disponible. Los resultados señalaron que la fibra de coco y sus combinaciones presentaron los valores más favorables de la porosidad total, porosidad de retención de agua y el agua total disponible, en concordancia con lo reportado por la literatura especializada. El tezontle mostró la menor porosidad de retención de agua (17.5%), mientras que la fibra de coco destacó por su elevada capacidad de retención hídrica (58.7%) y su baja densidad aparente (0.06 Mg m^{-3}). Las mezclas presentaron una granulometría equilibrada, a diferencia de los sustratos puros, que mostraron exceso de partículas finas. El agua total disponible presentó correlaciones positivas con la porosidad de retención de agua ($r^2 = 0.91$) y con la fracción fina ($r^2 = 0.75$) y negativas con las partículas gruesas ($r^2 = -0.76$) y con la porosidad de aireación ($r^2 = -0.6$). En general, las combinaciones con fibra de coco ofrecieron condiciones físicas adecuadas que favorecen un manejo eficiente del agua en sistemas de cultivo sin suelo.

Palabras clave:

agua total disponible, compost, fibra de coco, granulometría, porosidad total, porosidad total tezontle.



Introducción

En la actualidad, las características de los sustratos utilizados en prácticas agrícolas como la hidroponía, resultan decisivas en el desarrollo de las plantas y en la obtención de buenos rendimientos (Velázquez-González *et al.* , 2022 ; Flores-Sánchez *et al.* , 2025). Según Lazcano-Bello *et al.* (2021) , estos sustratos ofrecen un entorno controlado para el desarrollo radicular y garantizan soporte físico, buena aireación y una adecuada distribución del agua y nutrientes.

En este contexto, diversas investigaciones estudian las propiedades de materiales orgánicos e inorgánicos que se emplean en la producción agrícola protegida (Gayosso#Rodríguez *et al.* , 2021 ; Shafer *et al.* , 2022). Para elegir el sustrato adecuado se debe hacer una caracterización minuciosa de sus propiedades físicas ya que estas expresan la relación que existe entre disponibilidad de agua, oxígeno y nutrientes, condición esencial para lograr un mejor aprovechamiento del potencial productivo del cultivo (Montoya-Jasso *et al.* , 2021 ; Mixquititla *et al.* , 2022).

Numerosos estudios reportan que el tamaño, la forma y la naturaleza de las partículas determinan la relación agua-aire en un sustrato. Mixquititla *et al.* (2022) , al estudiar la influencia de la granulometría de diferentes sustratos sobre la retención de agua y la porosidad, encontraron que en la medida que aumenta el tamaño de partícula, también aumenta la capacidad de aireación y disminuye la capacidad de retención de agua.

Los resultados de Gayosso-Rodríguez *et al.* (2021) , analizaron aserrín de pino, bagazo de henequén, fibra de coco, viruta y sargazo y encontraron que con partículas ≤ 5 mm se logró una porosidad de aireación cercana a 30% y retención de agua superior a 50%, características físicas que definen un buen sustrato. En viveros forestales, Boudreault *et al.* (2023) describieron valores de porosidad de aireación cercanos al 10% y de porosidad de retención de agua de 30 a 45% como adecuados para cultivo del abeto blanco (*Abies alba*).

En este contexto, el estudio tuvo como objetivo evaluar y comparar las propiedades físicas de sustratos orgánicos e inorgánicos y sus mezclas, con el fin de identificar aquellos con mayor capacidad de retención de agua para su empleo en sistemas de agricultura protegida.

Materiales y métodos

El trabajo se realizó en el laboratorio de Física de Suelos, del Posgrado en Edafología del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Los sustratos utilizados fueron: tezontle rojo, fibra de coco y compost ovino y sus combinaciones (Cuadro 1). Las propiedades físicas que se determinaron fueron: porosidad total (PT), densidad aparente (Da), porosidad de aireación (PA), porosidad de retención de agua (PRA), granulometría, agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR) y agua total disponible (ATD).

Cuadro 1. Relación de sustratos y combinaciones utilizadas.

Sustratos	Descripción
S1	Tezontle-fibra de coco (50-50%)
S2	Tezontle-compost (50-50%)
S3	Tezontle-fibra de coco-compost (34-33-33%)
S4	Fibra de coco-compost (50-50%)
S5	Tezontle (100%)
S6	Fibra de coco (100%)
S7	Compost (100%)

Porosidad (%)

La porosidad de los sustratos se determinó según el método descrito por Landis *et al.* (1990). Los sustratos fueron saturados y posteriormente se dejaron reposar durante 24 h. Se emplearon

permeámetros de plástico, a los cuales se les determinó el volumen, se tararon y se etiquetaron. Una vez transcurrido el periodo de reposo, los permeámetros se llenaron con los sustratos previamente saturados y se pesaron utilizando una báscula de precisión (Mettler 2000).

Posteriormente, se permitió el drenaje del agua de las muestras contenidas en los envases y se registró el peso del sustrato drenado. Luego se secaron las muestras en la estufa a 105 °C hasta obtener el peso constante. Para cada sustrato se realizaron tres repeticiones. Con los datos obtenidos se calcularon la porosidad total (PT), la porosidad de aireación (PA) y la porosidad de retención de agua (PRA).

Las expresiones empleadas fueron las siguientes:

$$PT \% = \frac{V_{tp}}{V_p} * 100$$

$$PA \% = \frac{V_{pa}}{V_p} * 100$$

$$PRA \% = PT - PA$$

Donde: V_{tp} = volumen total de poros= peso del sustrato saturado-peso del sustrato seco; V_p = volumen del permeámetro; V_{pa} = volumen poros aireación= peso del sustrato saturado-peso del sustrato drenado.

Previo al análisis estadístico, se verificaron los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk), y homogeneidad de varianzas (Levene) ($\alpha = 0.05$). Posteriormente, se realizó un Anova y se compararon las medias con la prueba HSD de Tukey ($\alpha = 0.05$). Los análisis se efectuaron en R versión 4.3.2 (R Core Team, 2025).

Granulometría (%)

Para determinar el diámetro de partículas de los sustratos se utilizó la metodología descrita por Bunt (1988) . Se emplearon siete tamices, cuyos diámetros de las mallas (mm) fueron los siguientes: 6.36, 4.76, 3.36, 2, 1, 0.5, 0.25 y la base. Se ubicaron de manera descendente, luego de pesar cada tamiz. Se colocaron muestras de 500 g en la columna de tamices y se sometieron a oscilación por tres minutos en el agitador.

A continuación, se pesaron los tamices con las muestras de sustratos contenidas en cada uno de ellos. Se determinaron los porcentajes correspondiente a partículas finas (<0.5 mm), partículas gruesas (>1 mm) y el rango óptimo (0.5-4 mm) recomendado por Bunt (1988) ; Cabrera (1995) .

Retención de agua y densidad aparente

Para esta prueba se utilizó el método propuesto por De Boodt *et al.* (1974) , con tres repeticiones por cada sustrato. Se dispuso de un equipo de embudos de succión que poseen una placa de vidrio porosa conectada a una manguera que llega a un filtro poroso. Se llevó a cabo la succión a 10, 50 y 100 cm de columna de agua. Se llenaron los embudos con las muestras saturadas para evitar evaporación.

Se tomaron muestras a 0 cm de tensión de columna de agua y se pusieron en cilindros metálicos. Se determinó el peso húmedo de las muestras y se secaron en la estufa a 105 °C, hasta obtener peso constante. El proceso se repitió para 10, 50 y 100 cm de tensión de columna de agua. Los datos obtenidos permitieron calcular el contenido de humedad, por el método gravimétrico y la densidad aparente.

Se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$Hg = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} * 100$$

$$Da = \frac{P_{ss}}{V_p}$$

Donde: Hg = contenido de humedad (%); Da = densidad aparente (Mg m^{-3}); Psh = peso del sustrato húmedo (g); Pss= peso del sustrato seco (g); Vp= volumen del permeámetro.

Se obtuvieron las curvas correspondientes y se identificaron los siguientes rangos de humedad: agua no disponible (AND), de 0 a 10 cm de columna de agua; agua fácilmente disponible (AFD), de 10 a 50 cm de columna de agua; agua de reserva (AR), de 50 a 100 cm de columna de agua y agua difícilmente disponible (ADD), más de 100 cm de columna de agua.

Después de verificar normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene) ($\alpha = 0.05$), se realizó un Anova y se compararon las medias con prueba de Tukey HSD ($\alpha = 0.05$), utilizando R, versión 4.3.2 (R Core Team, 2025).

Relación entre el tamaño de partículas, la porosidad y la retención de agua

Con el propósito de analizar la relación entre la granulometría, la porosidad y la capacidad de retención hídrica, se evaluaron las siguientes propiedades físicas en los siete sustratos analizados: proporción de partículas finas (<0.5 mm) y gruesas (>1 mm), porosidad de aireación (PA), porosidad de retención de agua (PRA) y porcentaje de agua aprovechable o agua total disponible (ATD). Se aplicó la prueba de correlación de Pearson para determinar la fuerza y dirección de las relaciones entre las propiedades físicas de los sustratos. El análisis se llevó a cabo mediante el software R, versión 4.3.2 (R Core Team, 2025).

Resultados y discusión

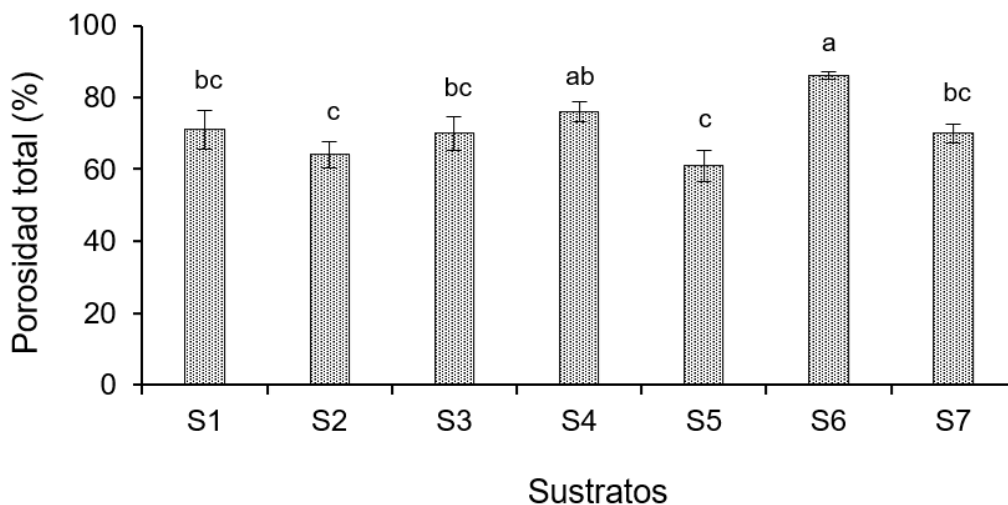
Porosidad (%)

La porosidad se refiere a los espacios vacíos dentro del sustrato, es fundamental tanto para la circulación del aire como para el movimiento del agua, por tanto, incluye la porosidad de aireación y la porosidad de retención de agua (Wright *et al.*, 2025).

Los sustratos evaluados presentaron porosidad total (PT) entre 61 y 86% (Figura 1). El valor más bajo correspondió a S5 (100% tezontle) y el más alto a S6 (100% fibra de coco), con diferencias significativas respecto a los demás, excepto S4 (76%). Según Abad *et al.* (1993); Caron y Michel (2021), la PT adecuada oscila entre 70 y 85%, por lo que S2 (50% tezontle-compost), con un valor de 64% y S5 (61%) no cumplen con este criterio.



Figura 1. Porosidad total de los sustratos evaluados. Los valores que no comparten una letra presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$). Las barras representan $\pm$ error estándar de la media ($n = 3$). S1= tezontle-fibra de coco (50-50%); S2= tezontle-compost (50-50%); S3= tezontle-fibra de coco-compost (34-33-33%); S4= fibra de coco-compost (50-50%); S5= tezontle (100%); S6= fibra de coco (100%); S7= compost (100%).

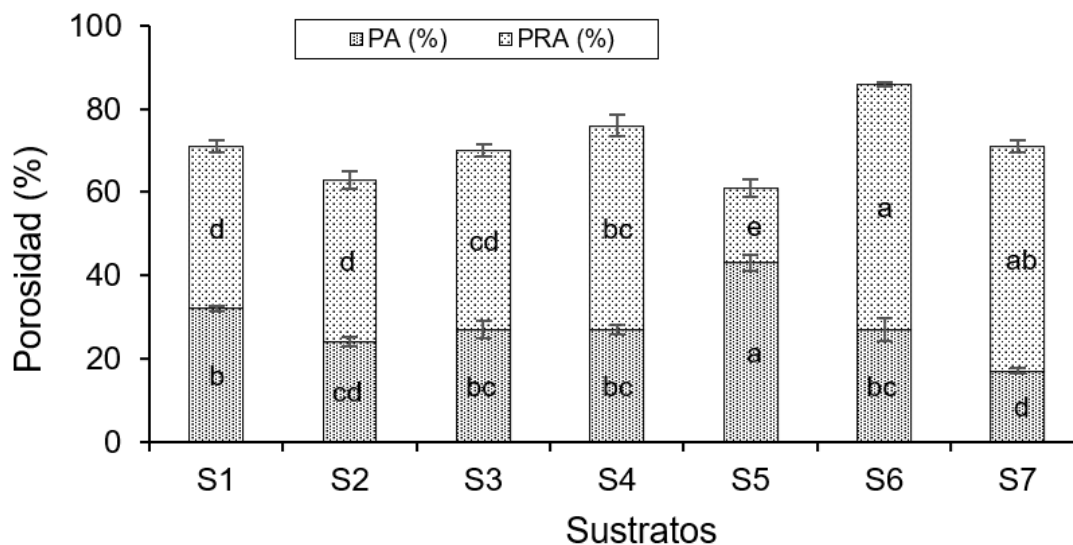


La fibra de coco y sus mezclas mostraron los valores más altos de PT, en concordancia con lo reportado por Soto-Bravo y Betancourt-Flores (2022) , quienes registraron valores superiores al 90% en este sustrato, en cultivo de jitomate en invernadero. Thiessen *et al.* (2024) también encontraron valores entre 83 y 92% de PT en cultivo de petunias en invernadero.

La porosidad de aireación (PA) varió entre los sustratos (Figura 2), con el valor más alto en S5 (100% tezontle, 43%), que presentó diferencias estadísticas significativas respecto a los demás tratamientos, y el más bajo en S7 (100% compost, 17%). El sustrato S1 también presentó un valor elevado (32%), superando junto con S5 el rango óptimo de 10-30% (Cabrera, 1995 ; Caron y Michel, 2021). En contraste, S2, S3, S4 y S6 mostraron valores dentro del intervalo recomendado y sin diferencias estadísticas entre ellos. En general, la fibra de coco, el compost y sus mezclas presentaron los niveles más adecuados de PA.



Figura 2. Porosidad de aireación y de retención de agua de los sustratos evaluados. Los valores que no comparten una letra presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$). Las barras representan $\pm$ error estándar de la media ($n=3$). S1= tezontle-fibra de coco (50-50%); S2= tezontle-compost (50-50%); S3= tezontle-fibra de coco-compost (34-33-33%); S4= fibra de coco-compost (50-50%); S5= tezontle (100%); S6= fibra de coco (100%); S7= compost (100%).



Como se aprecia en la Figura 2, la porosidad de retención de agua (PRA) fue más alta en S6 (100% fibra de coco, 59%), superando el valor mínimo (55%), según los criterios propuestos por Caron y Michel (2021) y mostró diferencias significativas con los demás sustratos, excepto S7 (100% compost). El valor más bajo (18%) correspondió a S5 (100% tezontle). Los valores del compost (53%) y de la mezcla compost-fibra de coco (49%) se aproximaron al umbral mínimo sugerido por los autores antes mencionados.

Investigaciones como las de Gomes *et al.* (2023); Fen *et al.* (2026), coinciden con quienes señalan que una mayor proporción de fibra de coco incrementa la retención de agua por su textura fibrosa, lo que reduce la porosidad de aireación y mejora la capacidad de retención hídrica.

Retención de agua y densidad aparente

El agua aprovechable o agua total disponible está compuesta por dos fracciones: el agua fácilmente disponible (AFD) y el agua de reserva (AR). Esta fracción representa el volumen de agua que una planta puede absorber y utilizar para sus funciones fisiológicas (De Jong *et al.*, 2024). Los valores de agua fácilmente disponible (AFD) variaron entre 7% y 37%, siendo S6 (fibra de coco 100%) el de mayor capacidad, con diferencias significativas frente al resto de los tratamientos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Comparación de medias del agua fácilmente disponible, agua de reserva y densidad aparente de los sustratos evaluados.

Sustratos	AFD (%)	AR (%)	ATD (%)	Da (Mg m ⁻³)
S1	17 bc	4 cd	21 bc	0.58 b
S2	8 d	1 d	9 d	0.89 a
S3	12 bcd	13 a	25 bc	0.59 b
S4	20 b	11 ab	31 b	0.32 c
S5	7 d	2 cd	9 d	0.9 a

Sustratos	AFD (%)	AR (%)	ATD (%)	Da (Mg m ⁻³)
S6	37 a	7 bc	44 a	0.06 d
S7	10 cd	6 bcd	16 cd	0.59 b
Rango óptimo1	20 - 30	4 - 10	24 - 40	< 0.4

1= Abad *et al.* (1993) . Los valores que no comparten una letra presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$). AFD= agua fácilmente disponible; AR= agua de reserva; ATD= agua total disponible; Da= densidad aparente; S1= tezontle-fibra de coco (50-50%); S2= tezontle-compost (50-50%); S3= tezontle-fibra de coco-compost (34-33-33%); S4= fibra de coco-compost (50-50%); S5= tezontle (100%); S6= fibra de coco (100%); S7= compost (100%).

Las mezclas con fibra de coco (S1, S3 y S4) no difirieron entre sí, aunque solo S4 (fibra de coco-compost 50-50%) se ubicó dentro del rango óptimo (20-30%), recomendado por Abad *et al.* (1993) . En cuanto al agua de reserva (AR), los sustratos S1, S6 y S7 estuvieron dentro del intervalo ideal (4-10%), mientras que S4 (11%) se aproximó al límite superior. Los sustratos S3 y S4 mostraron los valores de agua total disponible (ATD) más adecuados (25 y 31%), ajustándose al rango ideal (24-40%) propuesto por Abad *et al.* (1993) . La mezcla tezontle-fibra de coco (50-50%) también presentó un valor cercano al límite inferior sugerido por estos autores (21%)

Los valores de densidad aparente (Da) se ubicaron en un intervalo de 0.06 a 0.9 Mg m⁻³ (Cuadro 2). El valor más bajo correspondió al sustrato S6 (fibra de coco 100%), mientras que el más alto fue registrado por S5 (tezontle 100%), sin diferencias significativas con S2 (tezontle-compost 50-50%), pero sí con el resto de los sustratos. El sustrato S4 (fibra de coco-compost 50-50%) con 0.32 Mg m⁻³ se ubicó en el rango óptimo (0.2-0.4 Mg m⁻³) (Abad *et al.* , 2005).

En este sentido Flores-Sánchez *et al.* (2025) considera adecuados valores menores de 0.8 Mg m⁻³, criterio que cumplen S1, S3 y S7. En cambio, S6 (fibra de coco 100%) con 0.06 Mg m⁻³ quedó fuera del rango recomendado, lo que indica una porosidad excesiva y baja estabilidad que favorece la descomposición física gradual del sustrato (Zhao *et al.* , 2024). Las mezclas con fibra de coco y compost mostraron los valores más equilibrados de densidad aparente.

Granulometría (%)

El tamaño de las partículas de un sustrato determina su porosidad y por tanto, su capacidad de retener agua y de favorecer la aireación (Durand *et al.* , 2025). Para evaluar la granulometría de los sustratos, Bunt (1988) ; Cabrera (1995) recomiendan que al menos 60% de las partículas estén entre 0.5 y 4 mm y que las finas (<0.5 mm) no superen el 20%.

Los resultados que se muestran en el Cuadro 3 , expresaron que todos los sustratos, excepto S4, superan el porcentaje recomendado de partículas entre 0.5 y 4 mm. Sin embargo, solo S1, S2 y S3 cumplen con el límite de partículas finas (<0.5 mm), por lo que presentan la mejor composición. En cambio, los sustratos puros de tezontle, fibra de coco y compost no garantizan una adecuada composición de partículas, debido a que presentan un elevado porcentaje de partículas menores de 0.5 mm (Cuadro 3).

Cuadro 3. Granulometría de los sustratos evaluados.							
Clasificación de partículas	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Finas <0.5 mm (%)	11.9	17.9	18.6	40.1	28.9	39.3	25.6
Gruesas >1 mm (%)	68.5	57.3	61.7	25.4	53.5	17.7	42.6
Rango óptimo1 0.5-4 mm (%)	70.5	74.5	70.5	56	64.5	61.4	69.9

1= Bunt (1988) ; Cabrera (1995) . S1= tezontle-fibra de coco (50-50%); S2= tezontle-compost (50-50%); S3= tezontle-fibra de coco-compost (34-33-33%); S4= fibra de coco-compost (50-50%); S5= tezontle (100%); S6= fibra de coco (100%); S7= compost (100%).

Relación entre tamaño de partículas, porosidad y retención de agua

El Cuadro 4 presenta los resultados de la matriz de correlación de Pearson entre las variables analizadas. Se observó una correlación positiva alta entre la porosidad de retención de agua (PRA) y el agua total disponible (ATD) ($r^2 = 0.91$).

Cuadro 4. Matriz de correlación de Pearson entre variables físicas de los sustratos evaluados.

Variables	PF	PG	PA	PRA	ATD
PF	1	-0.94	-0.1	0.65	0.75
PG	-0.94	1	0.15	-0.71	-0.76
PA	-0.1	0.15	1	-0.35	-0.6
PRA	0.65	-0.71	-0.35	1	0.91
ATD	0.75	-0.76	-0.6	0.91	1

PF= partículas finas; PG= partículas gruesas; PA= porosidad de aireación; PRA= porosidad de retención de agua; ATD= agua total disponible.

Según lo reportado por Fields *et al.* (2020) ; Durand *et al.* (2023) , una mayor proporción de poros funcionales favorece significativamente la capacidad del sustrato para retener agua útil y así mejorar su eficiencia hídrica. Esta relación se confirma en el Cuadro 5 , donde el sustrato S6, que registró el valor más alto de PRA (58.7%), también presentó el mayor contenido de ATD (44%). De manera similar, el menor valor de PRA (17.5%) coincidió con el menor registro de ATD (9%).

Cuadro 5. Propiedades físicas utilizadas para analizar la relación entre tamaño de partículas, porosidad y retención de agua.

Sustratos	PF (%)	PG (%)	PA (%)	PRA (%)	ATD (%)
S1	11.9	68.5	32.44	38.99	21
S2	17.9	57.3	24.31	39.45	9
S3	18.6	61.8	27.17	42.95	25
S4	40.1	25.4	27.48	48.75	31
S5	28.9	53.5	43.16	17.51	9
S6	39.3	17.7	27.47	58.71	44
S7	25.6	42.6	16.62	53.58	16

PF= partículas finas; PG= partículas gruesas; PA= porosidad de aireación; PRA= porosidad de retención de agua; ATD= agua total disponible; S1= tezontle-fibra de coco (50-50%); S2= tezontle-compost (50-50%); S3= tezontle-fibra de coco-compost (34-33-33%); S4= fibra de coco-compost (50-50%); S5= tezontle (100%); S6= fibra de coco (100%); S7= compost (100%).

Asimismo, en el Cuadro 4 se observó una correlación positiva entre el contenido de partículas finas y el ATD ($r^2 = 0.75$), en concordancia con lo reportado por Abad *et al.* (2005) , quienes demostraron que la fibra de coco mejora significativamente la capacidad de retención hídrica de los sustratos. Esta relación también se expresa en el Cuadro 5 , donde los mayores registros de PF (S4 y S6) coinciden con los valores superiores de ATD.

En cuanto a las correlaciones PG-ATD y PA-ATD, se apreció que ambas fueron negativas (Cuadro 4). La primera presentó un coeficiente de correlación de -0.76 y la segunda de -0.6, lo cual sugiere que el incremento de partículas gruesas y de poros de aireación reduce la fracción de agua disponible en los sustratos estudiados.

Estos resultados confirman la importancia de la porosidad de retención de agua (PRA) y del contenido de partículas finas en la capacidad de retención hídrica de los sustratos hortícolas. Por tanto, es importante tener en cuenta estas características físicas a la hora de realizar combinaciones de sustratos, con el fin de optimizar el uso del agua y favorecer un adecuado rendimiento productivo (Fields *et al.* , 2020 ; Durand *et al.* , 2023 ; Abad *et al.* , 2005).

Conclusiones

El sustrato con el 100% de fibra de coco, así como sus combinaciones, presentaron los mejores valores de porosidad total. Los mejores resultados de porosidad de aireación y porosidad de retención de agua correspondieron a los sustratos con 100% de fibra de coco, 100% de compost y sus combinaciones.

Las mezclas compuestas por: tezontle fibra de coco (50-50%), tezontle-compost (50-50%) y tezontle-fibra de coco-compost (34-33-33%) presentaron una composición granulométrica dentro de los rangos óptimos establecidos en la literatura, mientras que los sustratos compuestos exclusivamente por fibra de coco, tezontle o compost mostraron un contenido de partículas finas superior al recomendado.

Se identificó una correlación directa entre la porosidad de retención de agua y el porcentaje de partículas finas, con respecto al contenido de agua total disponible en los sustratos evaluados.

En contraste, un mayor porcentaje de poros de aireación y de partículas gruesas se asoció con una disminución del agua aprovechable. Los sustratos compuestos por mezclas de fibra de coco con tezontle y compost en distintas proporciones (S1, S3 y S4), registraron los mejores contenidos de agua total disponible (agua aprovechable), característica que garantizan un uso eficiente del agua en sistemas de producción agrícola protegidos.

Bibliografía

- 1 Abad, M.; Fornes, F.; Carrión, C.; Noguera, V.; Noguera, P.; Maquieira, Á. and Puchades, R. 2005. Physical properties of various coconut coir dusts compared to peat. *HortScience*. 40(7):2138-2144. <https://doi.org/10.21273/hortsci.40.7.2138>.
- 2 Abad, M.; Martínez-Herrero, M. D.; Martínez-García, P. F. y Martínez-Corts, J. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Acta Horticulturae*. 11:141-154. <https://redivia.gva.es/handle/20.500.11939/8211>.
- 3 Boudreault, S.; Caron, J.; Lamhamedi, M. S. and Pepin, S. 2023. Comparison of hydraulic and aeration properties of peat substrates used to produce containerized white spruce seedlings (1+0) in forest nurseries. *Forests*. 14(4):858. <https://doi.org/10.3390/f14040858>.
- 4 Bunt, A. C. 1988. Media and mixes for container-grown plants: a manual on the preparation and use of growing media for pot plants 2nd (Ed.). Unwin Hyman. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-7904-3>.
- 5 Cabrera, R. I. 1995. Fundamentals of container media management: Part I. Physical properties. Rutgers cooperative extension. Fact sheet No. FS812. New Brunswick, New Jersey, USA. 8 p. <https://njaes.rutgers.edu/pubs/publication.php?pid=FS812>.
- 6 Caron, J. and Michel, J. 2021. Understanding and optimizing the physical properties of growing media for soilless cultivation. In: Gruda, N. S. (Ed.), *Advances in horticultural soilless culture*. 107-137 pp. Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781003048206-6>.
- 7 De Boodt, M.; Verdonck, O. y Cappaert, I. 1974. Método para la medición de la curva de liberación de agua de sustratos orgánicos. *Acta Horticulturae*. 37:2054-2063. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1974.37.20>.
- 8 De Jong van Lier, Q.; Abreu de Melo, M. L. and Alves, R. P. E. 2024. Stochastic analysis of plant available water estimates and soil hydraulic characteristics. *Vadose Zone Journal*. 23(3):e20306. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20306>.
- 9 Durand, S.; Boivin, P. y Michel, J. 2025. Organización en fase sólida y propiedades de contracción de algunos componentes de medios de cultivo según el tamaño de partícula. *Soil Science Society of America Journal*. 89(6):e70159. <https://doi.org/10.1002/saj2.70159>.

- 10 Durand, S.; Jackson, B. E.; Fonteno, W. C. and Michel, J. C. 2023. Advances in substrate particle characterization using dynamic image analysis compared to sieving procedure for predicting water retention properties. *Acta Horticulturae*. 1377:537-544. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1377.66>.
- 11 Feng, X.; Zou, P.; Wang, Q.; Wang, H.; Li, X. and Wang, J. 2026. Modeling moisture content and analyzing water infiltration in coconut coir substrate using RGB image recognition and machine learning. *MDPI*. 16(2):219. <https://doi.org/10.3390/agriculture16020219>.
- 12 Fields, J. S.; Owen, J. S. and Altland, J. E. 2020. Optimizing substrate available water and coir amendment rate n pine bark substrates. *Water*. 12(2):362. <https://doi.org/10.3390/w12020362>.
- 13 Flores-Sánchez, I. D.; Sandoval-Villa, M. and Trejo-Téllez, L. I. 2025. Basic proposal for evaluation of plant genetic resources to generate new crops. *Frontiers in Plant Science*. 16:1507521. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1507521>.
- 14 Gayosso#Rodríguez, S.; Gutiérrez-Castorena, M. C.; Estrada-Botello, M. A. y Sánchez-Hernández, R. 2021. Características micromorfológicas de sustratos orgánicos y su relación con retención de agua y crecimiento radical. *Agrociencia*. 55(3):195-208. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i3.2413>.
- 15 Gomes, F. S.; Motta, M. F. B.; Bernardes, G. de P. and Soares, P. V. 2023. Influence of coconut fiber on the microstructural, mechanical and hydraulic behavior of unsaturated compacted soil. *Soils and Rocks*. 46(2):e2023013322. <https://doi.org/10.28927/SR.2023.013322>.
- 16 Landis, T. D. 1990. Containers: types and functions. In: *The container tree nursery manual*. Landis, T. D.; Tinus, R. W.; McDonald, S. E. y Barnett, J. P. (eds.). Volume 2. Department of Agriculture, Forest Service. Washington, DC, USA. 41-85 pp. <https://es.scribd.com/document/594534513/container-tree-nursery-manual-chap-2?utm>.
- 17 Lazcano-Bello, M. I.; Sandoval-Castro, E.; Tornero-Campante, M. A.; Hernández Hernández, B. N.; Ocampo-Fletes, I. y Díaz-Ruiz, R. 2021. Evaluación de sustratos, solución nutritiva y enraizador en producción de plántulas de jitomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 12(1):101-113. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2450>.
- 18 Mixquitilla-Casbis, G.; Villegas-Torres, O. G.; Andrade-Rodríguez, M. y 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>.
- 19 Montoya-Jasso, V. M.; Ordaz-Chaparro, V. M.; Benedicto-Valdés, G. S.; Ruiz-Bello, A. y Arreola-Tostado, J. M. 2021. Caracterización química y física de sustratos enriquecidos con minerales y composta. *Terra Latinoamericana*. 39(1):15-27. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i1.1109>.
- 20 Schafer, G. and Lerner, B. L. 2022. Physical and chemical characteristics and analysis of plant substrate. *Ornamental Horticulture*. 28(2):1-15. <https://doi.org/10.1590/2447-536X.v28i2.2496>.
- 21 Soto-Bravo, F. y Betancourt-Flores, A. 2022. Evaluación de metodologías para determinar las características físicas de un sustrato de fibra de coco. *Agronomía Costarricense*. 46(2):29-45. <https://doi.org/10.15517/rac.v46i2.52044>.
- 22 Thiessen, M. E.; Fields, J. S. and Abdi, D. E. 2024. Physical properties and crop performance of four substrate fibers in greenhouse Petunia production. *Horticulturae*. 510(3):279. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10030279>.
- 23 Velázquez-González, R. S.; García-García, A. L.; Ventura-Zapata, E.; Barceinas- Sánchez, J. D. O. y Sosa-Saavedra, J. C. 2022. Una revisión sobre la hidroponía y las tecnologías asociadas para operaciones de mediana y pequeña escala. *Agriculture*. 12(5):646. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050646>.

- 24 Wright, H. C.; Wilkinson, S. W.; Morgan, C. W.; Rolfe, S. A.; Cameron, D. D. and Ryan, A. J. 2025. Polyurethane foam as a soilless growing media: demonstrating the importance of physical property optimization. *Frontiers in Horticulture*. 4:1646783. <https://doi.org/10.3389/fhort.2025.1646783>.
- 25 Zhao, R.; Sofkova- Bobcheva, S.; Cartmill, D. L.; Hardy, D. y Zernack, A. 2024. Evaluación comparativa de la piedra pómez como sustrato sin suelo para el cultivo en interiores de *Rubus idaeus* L. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*. 52(3):280-297. <https://doi.org/10.1080/01140671.2024.2358885>.



Caracterización física y desempeño hídrico de sustratos orgánicos, inorgánicos y sus combinaciones

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 March 2026
Date accepted: 01 May 2026
Publication date: 01 July 2026
Publication date: 2026
Volume: 17
Issue: 4
Electronic Location Identifier: e4358
DOI: 10.29312/remexca.v17i4.4117

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

agua total disponible
compost
fibra de coco
granulometría
porosidad total
tezonle

Counts

Figures: 2

Tables: 5

Equations: 5

References: 25

Pages: 0