

Inmovilización y retención nutrimental en aserrín de pino como sustrato agrícola

Immobilization and nutrient retention by pine sawdust for soilless culture

Joel Pineda Pineda^{1‡}, Felipe Sánchez del Castillo², Esaú del Carmen Moreno Pérez²,
Luis Alonso Valdez Aguilar³, Ana María Castillo González²,
Armando Ramírez Árias⁴ y Juan Manuel Vargas Canales⁵

¹ Depto. de Suelos, ² Depto. de Fitotecnia, ⁴ Depto. de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo. 56230 Texcoco, Edo. de México, México.

[‡] Autor para correspondencia (pinedapjoel@yahoo.com.mx)

³ Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista. 25253 Saltillo, Coahuila, México.

⁵ Departamento de Estudios Sociales. División de Ciencias Sociales y Administrativas, Campus Celaya-Salvatierra. Universidad de Guanajuato. Av. Ing. Barros Sierra No. 201 Ejido de Santa María del Refugio. 38140 Celaya, Guanajuato, México.

RESUMEN

El aserrín de pino (*Pinus* sp.) compostado se ha utilizado como medio de crecimiento para el cultivo de hortalizas y ornamentales. En el presente trabajo el objetivo fue evaluar la inmovilización o retención de N, P, K y Ca en sustratos a base de aserrín de pino como principal componente, aplicando soluciones nutritivas Steiner de diferente concentración nutrimental (20, 30 y 40 meq L⁻¹). Se utilizó aserrín de pino no compostado, solo o en mezclas (70/30, v/v) con tezontle de diferentes tamaños de partícula (fino ≤ 3 mm, medio 3-6 mm y grueso 6-12 mm). Durante dos meses después del trasplante (ddt) se colectó el agua lixiviada todos los días, y cada 10 días se midió la concentración promedio de N, P, K y Ca, así como pH y conductividad eléctrica (CE). Se observó efecto de la interacción sustrato × concentración de la solución nutritiva en las concentraciones de N, P, K y Ca en el agua lixiviada, las cuales aumentaron en relación a la concentración de la solución nutritiva y conforme el tamaño de partícula de tezontle disminuyó. Cuando el riego se dio con solución nutritiva a 20 meq L⁻¹ (2 dS m⁻¹) la concentración de N, P, K y Ca en el agua lixiviada siempre fue inferior a la concentración en la solución de aporte, mientras que el riego con 30 o 40 meq L⁻¹ (2 o 4 dS m⁻¹) generó una concentración similar en el agua lixiviada hasta los 20 o 30 ddt, después de los 40 ddt la concentración de estos en el agua lixiviada fue superior. La inmovilización de N

y retención de P, K y Ca en el sustrato aserrín se dio durante los primeros 40 ddt, lo que se relacionó con un incremento en pH (hasta 8.6), con una disminución en la CE (hasta 0.5 dS m⁻¹) y con concentraciones bajas de N, P, K y Ca en el agua lixiviada.

Palabras clave: agua lixiviada, drenaje, macronutrientes, pH.

SUMMARY

Pine (*Pinus* sp.) sawdust has been used as a growing medium for the cultivation of vegetables and ornamentals. In the present work the objective was to assess the immobilization or retention of N, P, K, and Ca in pine sawdust as the main substrate component by applying Steiner nutrient solution at different concentrations (20, 30 and 40 meq L⁻¹). We used uncomposted sawdust, alone or in mixtures (70/30, v/v) with volcanic tuff of different particle sizes (fine ≤ 3 mm, medium 3-6 mm, and coarse 6-12 mm). For two months, leachate was collected daily, and every 10 days, the average concentrations of N, P, K, and Ca, as well as pH and electrical conductivity (EC) were measured. The effect of the interaction substrate × nutrient solution concentration on N, P, K and Ca in the leached water was observed. These nutrients increased in concentration in the leachate water in accord with the nutrient solution concentration and as the diameter of volcanic tuff particles diminished. Irrigation with

Cita recomendada:

Pineda Pineda, J., F. Sánchez del Castillo, E. C. Moreno Pérez, L. A. Valdez Aguilar, A. M. Castillo González, A. Ramírez Árias y J. M. Vargas Canales. 2019. Inmovilización y retención nutrimental en aserrín de pino como sustrato agrícola. *Terra Latinoamericana* 37: 261-271.
DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.448>

Recibido: 24 de septiembre de 2018.

Aceptado: 14 de marzo de 2019.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 37: 261-271.

20 meq L⁻¹ (2 dS m⁻¹) concentration of nutrient solution reduced the concentration of N, P, K, and Ca in leached water below its concentration in the supplied nutrient solution, while irrigation with 30 or 40 meq L⁻¹ (2 or 4 dS m⁻¹) resulted in similar concentration in leached water up to 20 or 30 dat, but at 40 dat, concentration of these nutrients in the leached water was higher. Immobilization of N and P, K, and Ca retention in the sawdust substrate occurred during the first 40 ddt, related to an increase in pH (up to 8.6), a decrease in EC (until 0.5 dS m⁻¹) and low concentrations of N, P, K, and Ca in the leached water.

Index words: *drainage, leachate water, macro-nutrients, pH.*

INTRODUCCIÓN

El aserrín de pino (*Pinus* sp.) bien compostado se ha utilizado con éxito como medio de crecimiento para el cultivo de hortalizas y plantas ornamentales (Parks *et al.*, 2004; Prasad y Maher, 2004; Jackson *et al.*, 2008), tiene un efecto supresor sobre el desarrollo de microorganismos patógenos, por lo que disminuyen las posibilidades de infección con *Fusarium*, *Rizoctonia*, *Streptomyces* y *Phytium*, que atacan a la raíz (Resh, 2001). Es un material orgánico que se descompone muy lentamente debido a su alta relación C/N en los compuestos lignocelulósicos (Aguilera *et al.*, 2016; Handreck y Black, 2005), característica que determina las tasas altas de inmovilización de nutrimentos, sobre todo de N (Gayosso *et al.*, 2018; Mateo *et al.*, 2014); por ello se requiere aplicar fertilizantes de liberación lenta durante el periodo de crecimiento de las plantas para compensar el N inmovilizado por los microorganismos (Barbazán *et al.*, 2011; Gruda y Schnitzler, 2004). Durante la descomposición de los materiales orgánicos, el N liberado es incorporado a los tejidos microbianos (inmovilización), fenómeno que es máximo en el aserrín, ya que presenta una relación C/N de 250 a 800, con valores frecuentes arriba de 500 (Aguilera *et al.*, 2016; Gayosso, 2018; Handreck y Black, 2005), y se minimiza cuando la relación C/N disminuye a 40 - 20 que se considera óptima para el cultivo de plantas en sustrato (Abad *et al.*, 2005); en este momento, el contenido de carbono disminuye y el de nitrógeno se incrementa, y con ello se reduce la relación C/N, el fenómeno de inmovilización se revierte y se inicia el proceso de mineralización neta

de N (Havlin *et al.*, 2005). Aunque el compostaje es una alternativa para estabilizar los materiales orgánicos y reducir la fitotoxicidad por sustancias fenólicas y resinas (Capistrán *et al.*, 1999; Havlin *et al.*, 2005), el proceso de transformación encarece la obtención de estos sustratos; además en el caso de residuos de madera se requiere adicionarles nutrimentos durante el compostaje para evitar deficiencias nutrimentales, especialmente de N (Handreck y Black, 2005; Gruda y Schnitzler, 2004).

Debido a la alta inmovilización de nutrimentos, el uso de aserrín para cultivar plantas es más difícil que otros materiales orgánicos, pero con un cuidado especial sobre el manejo de la nutrición, su uso como sustrato permite obtener plantas de buena calidad y altos rendimientos (Gayosso *et al.*, 2018; Handreck y Black, 2005); además, el aserrín de pino es abundante y de bajo costo en las zonas industriales forestales, puede ser utilizado solo o en mezclas, con o sin compostaje (Resh, 2001). Si el aserrín se mezcla adecuadamente con materiales inorgánicos como tezontle, el deterioro de las propiedades físicas y químicas de la mezcla puede ser más lenta, manteniéndose esas propiedades por mayor tiempo (Pineda *et al.*, 2012; Vargas *et al.*, 2014).

Con base en lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar la tasa de inmovilización o retención de N, P, K y Ca en el sustrato aserrín de pino sin compostaje previo y en mezclas aserrín/tezontle, para determinar la concentración de nutrimentos que debe aplicarse en la solución nutritiva para el cultivo de jitomate.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en un invernadero equipado con control climático, ubicado en Chapingo, Texcoco, estado de México. La temperatura promedio, máxima y mínima registrada durante el experimento fueron 13 y 32 °C, con humedad relativa y radiación solar promedio de 70% y 1200 μmol m⁻² s⁻¹, respectivamente. En charolas de unicele de 200 cavidades se germinaron semillas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Cid F1, como sustrato de siembra se utilizó una mezcla de perlita/turba 30/70 v/v. El trasplante se hizo a los 30 días después de la siembra, colocando dos plántulas en cada bolsa de polietileno bicolor (blanco/negro) de 20 L que se usó como unidad experimental y desarrolladas hasta lograr el sexto racimo de fruto. Los tratamientos

se formaron con un factorial 4×3 que corresponde a cuatro sustratos (aserrín de pino solo y mezclas 70/30 v/v de aserrín/tezontle con granulometría gruesa 6-12 mm, media 3-6 mm y fina < 3 mm, el aserrín contenía partículas ≤ 6 mm) y tres soluciones nutritivas de diferente concentración nutrimental (20, 30 y 40 meq L^{-1}), lo que generó un total de 12 tratamientos, los cuales fueron establecidos en el área experimental del invernadero en un diseño completamente al azar, con 4 repeticiones. El riego se dio con soluciones nutritivas de 20, 30 y 40 meq L^{-1} de cationes o aniones (Steiner, 1984), a las que correspondieron CE de 2, 3 y 4 dS m^{-1} , respectivamente, con pH de 6. La composición y concentración final de macronutrientes y micronutrientes de las soluciones nutritivas se indican en el Cuadro 1. El gasto del gotero de riego fue de 2 L h^{-1} , aplicando ocho riegos por día, con una duración de 2 a 6 minutos por riego según las exigencias de la planta y las condiciones ambientales; se mantuvo una fracción de lixiviación de 15 a 20% durante todo el experimento. El agua lixiviada se recolectó diariamente durante 60 días después del trasplante (ddt). Cada 10 días se determinó, en la mezcla de agua lixiviada de cada tratamiento, la concentración de N, P, K y Ca. El nitrógeno se midió por el método de micro-Kjeldahl, el fósforo por desarrollo de color con molibdovanadato y se midió en un espectrofotómetro (Bauch y Lomb, modelo Spectronic 20) a 420 nanómetro (Etchevers *et al.*, 2000). El Potasio fue determinado en un espectrofotómetro de flama (Flame-fotómetro de Corning, modelo 410) y el Ca con espectrofotometría de absorción atómica (GBC modelo Avanta). La CE y pH del agua lixiviada, se midieron diariamente durante 90 ddt utilizando un potenciómetro (Hanna Instruments, modelo HI 98130). A los datos se les hizo análisis de varianza y comparación de medias de acuerdo con

la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), utilizando el paquete estadístico SAS/STAT versión 8.0 (SAS, 1998).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Interacción Sustrato \times Concentración de la Solución Nutritiva y Efectos Individuales

La concentración de N, K y Ca en el agua lixiviada fue afectada por la interacción sustrato \times concentración de la solución nutritiva en todos los muestreos, mientras que para la concentración de P la interacción fue significativa solamente a los 20 y 40 ddt (Cuadro 2). Se encontraron efectos significativos del sustrato sobre la concentración de N y Ca en todos los muestreos; la concentración de P fue afectada sólo en las últimas fechas de muestreo, mientras que la concentración de potasio fue afectada por el sustrato sólo en los muestreos realizados a los 10, 40 y 50 ddt. La concentración de la solución nutritiva (CE) también tuvo efectos significativos sobre la concentración de nutrientes en el agua lixiviada, excepto en P a los 10 ddt (Cuadro 2). **Nitrógeno.** Al aumentar la concentración de la solución nutritiva aplicada, se incrementó el contenido de N en el agua lixiviada (Figura 1); sin embargo, en los muestreos a 10, 20 y 30 ddt la concentración de N fue menor respecto a la solución nutritiva aplicada, lo que indica inmovilización de N durante el proceso de descomposición del aserrín por las poblaciones microbianas, debido a su alta relación C/N (Mateo *et al.*, 2014; Handreck y Black, 2005). Después de los 40 ddt, la concentración de N en el agua lixiviada aumentó, incluso en la mezcla aserrín/tezontle fino + solución nutritiva de 40 meq L^{-1} , el N fue superior al de la solución nutritiva (Figura 1). El aumento de la concentración de N en la solución nutritiva condujo a

**Cuadro 1. Variación en la concentración de macronutrientes, con base en la solución nutritiva universal de Steiner (1984).
Table 1. Variation in micronutrient concentration, based on the universal nutrient solution of Steiner (1984).**

Solución nutritiva	Cationes					Aniones				
	meq L^{-1}									
	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
20	6.13	7.88	3.49	0.92	1.58	11.4	0.95	6.65	0.5	0.5
30	9.25	11.89	5.28	2.0	1.58	17.4	1.45	10.15	0.5	0.5
40	12.4	15.94	7.08	3.0	1.58	23.4	1.95	13.65	0.5	0.5

La concentración (mg L^{-1}) de micronutrientes fue: Fe 2, Mn 1, Zn 0.15, Cu 0.10, Mo 0.05 y B 0.60.
Micronutrient concentrations (mg L^{-1}) were Fe 2, Mn 1, Zn 0.15, Cu 0.10, Mo 0.05 and B 0.60.

Cuadro 2. Significancia de variables nutrimentales medidas en sustratos irrigados con solución nutritiva con diferentes concentraciones de macronutrientes durante dos meses de cultivo de jitomate.

Table 2. Significance of measured nutrient variables in substrates irrigated with nutrient solutions at different macronutrient concentrations during two months of tomato cultivation.

Factor	N						P						K						Ca					
	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60
----- Días después del trasplante (ddt). -----																								
S	**	**	**	**	**	**	ns	**	ns	*	**	**	**	ns	ns	**	**	ns	**	**	**	**	**	**
CE	**	**	**	**	**	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
S × CE	*	*	**	**	**	**	ns	*	ns	*	ns	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
CV	4.9	3.1	7.1	2.5	2.1	2	86	13	23	0.5	3.7	8.3	3.1	12	8	7.6	8.4	14	6.9	6.1	2.3	4.2	7.8	2.9

S = sustrato; CE = conductividad eléctrica (dS m⁻¹); CV = coeficiente de variación. ** significativo con $P \leq 0.01$; * significativo con $P \leq 0.05$; ns = no significativo. S = substrate; CE = electrical conductivity (dS m⁻¹); CV = coefficient of variation. ** significant with $P \leq 0.01$; * significant at $P \leq 0.05$; ns = not significant.

su mayor utilización, tanto por las plantas como por las poblaciones microbianas, y con una CE de 4 dS m⁻¹ después de los 40 ddt ya no hubo inmovilización neta o bien el N suministrado fue mayor que la absorción de N por las plantas y por los microorganismos (Havlin *et al.*, 2005). Contin *et al.* (2008) reportaron resultados similares en un sustrato de composta, donde al inicio del estudio, el N-mineral total era bajo, pero 56 días después, hubo un aumento de N-NO₃⁻ liberado. Al respecto, Prasad y Maher (2004) encontraron una inmovilización de 150 mg L⁻¹ de N por la actividad microbiana durante 5 semanas de incubación en fibra de madera, mientras que Gruda y Schnitzler (2004) indican que debe agregarse hasta 400 mg L⁻¹ de nitrógeno soluble en agua, para contrarrestar la inmovilización del N cuando se usa aserrín como sustrato, lo que es congruente con el efecto observado con la aplicación de la solución nutritiva de 4 dS m⁻¹ (336 mg L⁻¹ de N) en este trabajo (Figura 1).

Fósforo. Al igual que el N, durante los primeros 30 ddt, se presentó la menor concentración de P en el agua lixiviada (Figura 2), indicando alta inmovilización microbiana de P o retención por el sustrato, pero conforme transcurrió el tiempo (40, 50 y 60 ddt) la concentración de P aumentó gradualmente, pero sin llegar a superar la concentración del mismo en la SN de aporte. Durante los primeros 30 ddt la disminución en concentración de P en la solución del sustrato fue más evidente que en N, K y Ca, lo que se debe a la alta inmovilización por los microorganismos en materiales con relación C/P ≥ 300 como el aserrín (Brady y Weil, 2002; Havlin *et al.*, 2005), mayor interacción del P con el sustrato en reacciones de precipitación-

disolución y adsorción-desorción, determinadas por las características (pH, capacidad de intercambio aniónico, concentración de cationes) del medio de crecimiento, que explican la baja movilidad del P (Havlin *et al.*, 2005; Marschner, 2012) y aunque la movilidad del P en sustratos es mayor que en el suelo (Abad *et al.*, 2005), algunas investigaciones (Ojodeagua *et al.*, 2008; Pineda *et al.*, 2011) demuestran que los porcentajes de P perdidos en la solución drenada son menores a los porcentajes que se pierden de N, K, Ca y Mg.

Pineda *et al.* (2011) reportaron que el 54.8% del P fue retenido en el sustrato (tezontle) durante el crecimiento vegetativo del tomate. También Handreck y Black (2005) reportaron bajo contenido de P en la rizósfera de sustratos de fibras de madera. Ogden *et al.* (1987) observaron una alta retención de P por sustratos de cortezas de pino, lo que disminuyó el crecimiento de las plantas debido a su baja disponibilidad. Por ello, para aumentar la disponibilidad de P en la rizósfera e incrementar la absorción por las plantas, Silber (2008) sugiere disminuir el tiempo entre adiciones consecutivas de P, lo que se logró con un incremento en la frecuencia diaria de riego.

Potasio. Se observa que con el incremento de 20 a 40 meq L⁻¹ de la solución nutritiva, también se incrementó la concentración de K en el agua lixiviada, independientemente del medio de cultivo o la fecha de muestreo (Figura 3). En contraste con la lixiviación de N y P, existe una diferencia mínima entre la concentración de K en el agua lixiviada y en la SN, lo que sugiere que el K tiene una participación menor en los procesos de inmovilización o retención de nutrimentos por el sustrato, y que la concentración de K en la solución del

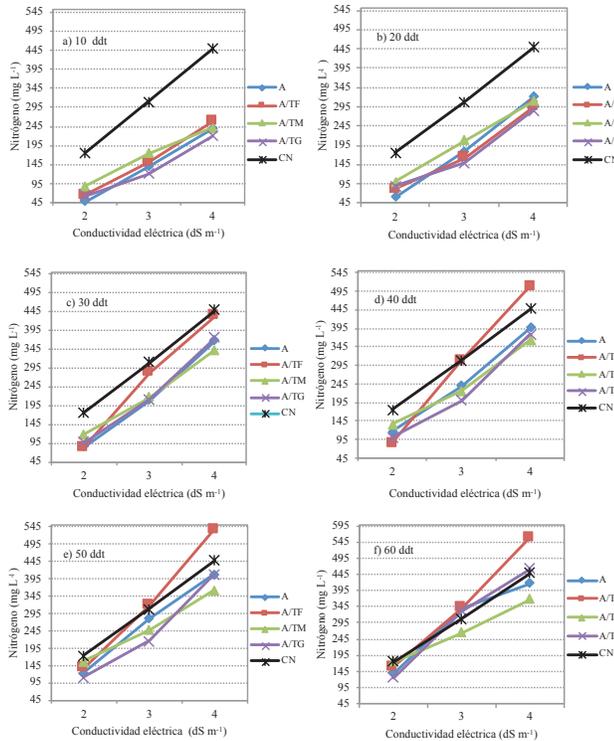


Figura 1. Efecto del sustrato y de la conductividad eléctrica en la solución nutritiva sobre la concentración de nitrógeno en el lixiviado a los 60 días después del trasplante de plantas de jitomate. A = aserrín; A/TF = aserrín/tezontle fino (≤ 3 mm); A/TM = aserrín/tezontle mediano (3-6 mm); A/TG = aserrín/tezontle grueso (6-12 mm); CN = concentración de nitrógeno en la solución nutritiva de aporte; ddt = días después del trasplante.

Figure 1. Effect of the substrate and nutrient solution electrical conductivity on nitrogen concentration in leachate 60 days after transplant of tomato plants. A = sawdust; A/TF = fine sawdust/tezontle (≤ 3 mm); A/TM = sawdust / medium tezontle (3-6 mm); A / TG = sawdust/coarse tezontle (6-12 mm); CN = concentration of nitrogen in the nutrient solution of contribution; ddt = days after transplant.

sustrato depende principalmente de la concentración de K en la SN aportada. Durante el período de 10 a 40 ddt, cuando la demanda de K por la planta es menor, la concentración de K en el agua lixiviada de los sustratos con diferente tamaño de partículas fue ligeramente inferior a la concentración de K en la SN suministrada, lo que puede atribuirse a la retención de K en los sitios de intercambio catiónico (Raviv y Lieth, 2008). Pero en los dos últimos muestreos (50 y 60 ddt), cuando ya existe mayor demanda de K por la planta, la concentración en el lixiviado fue superior al de la solución nutritiva, lo que se explica por el mayor aporte de solución nutritiva para satisfacer la evapotranspiración y por la saturación

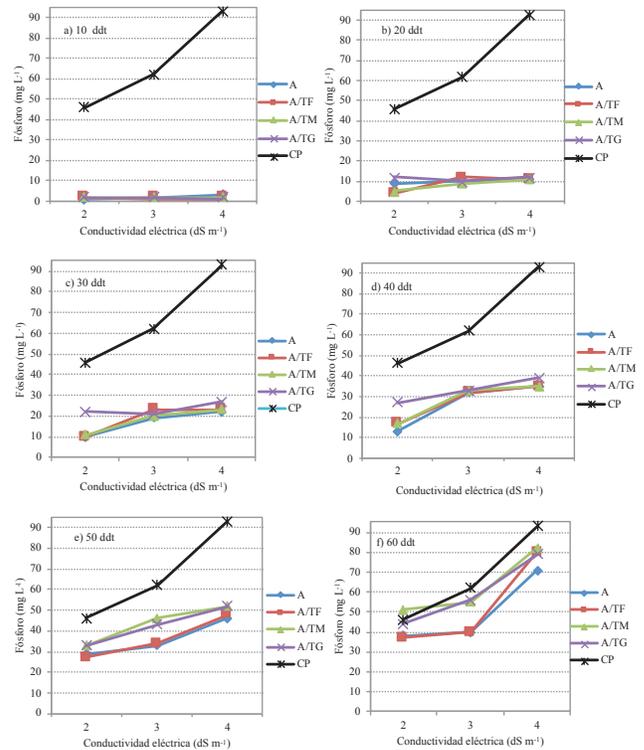


Figura 2. Efecto del sustrato y de la conductividad eléctrica en la solución nutritiva sobre el fósforo lixiviado dentro de los 60 días después del trasplante de plantas de jitomate. A = aserrín; A/TF = aserrín/tezontle fino (≤ 3 mm); A/TM = aserrín/tezontle mediano (3-6 mm); A/TG = aserrín/tezontle grueso (6-12 mm); CP = concentración de fósforo en la solución nutritiva de aporte; ddt = días después del trasplante.

Figure 2. Effect of the substrate and nutrient solution electrical conductivity on leached phosphorus within 60 days after transplant of tomato plants. A = sawdust; A / TF = fine sawdust / tezontle (≤ 3 mm); A / TM = sawdust / medium tezontle (3-6 mm); A / TG = sawdust / coarse tezontle (6-12 mm); CP = concentration of phosphorus in the nutrient solution of contribution; ddt = days after transplant.

de K en los sitios de intercambio durante los primeros 40 ddt (Silber, 2008). La concentración de K en el agua lixiviada, estuvo dentro del intervalo normal ($200\text{-}300\text{ mg L}^{-1}$) (Jones, 2005) en todas las fechas de muestreo y diámetros de partículas de los sustratos.

Calcio. En todos los sustratos, a mayor concentración de la SN (Figura 4) mayor concentración de Ca en el agua lixiviada. En los primeros 30 ddt se presentó la concentración más baja de Ca, lo que indica importante inmovilización o retención, como ocurrió con N y P, o bien precipitación química o retención de Ca en los sitios de intercambio catiónico, como ocurrió con K (Silber, 2008; Raviv y Lieth, 2008), ya que las paredes

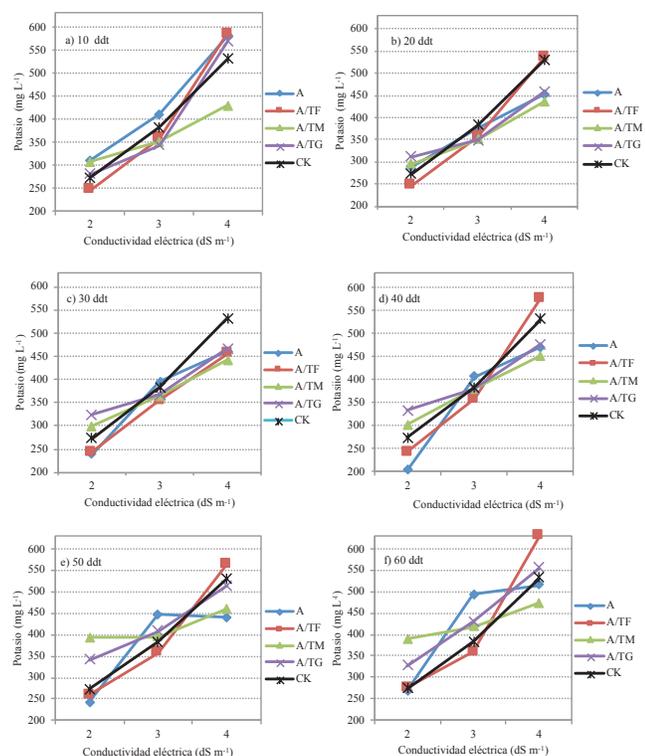


Figura 3. Efecto del sustrato y de la conductividad eléctrica en la solución nutritiva sobre la concentración de potasio en el lixiviado dentro de los 60 días después del trasplante de plantas de jitomate. A = aserrín; A/TF = aserrín/tezontle fino (≤ 3 mm); A/TM = aserrín/tezontle mediano (3-6 mm); A/TG = aserrín/tezontle grueso (6-12 mm); CK = concentración de potasio en la solución nutritiva de aporte; ddt = días después del trasplante.

Figure 3. Effect of substrate and nutrient solution electrical conductivity on potassium concentration in the leachate within 60 days after transplant of tomato plants. A = sawdust; A/TF = fine sawdust/tezontle (≤ 3 mm); A/TM = sawdust/medium tezontle (3-6 mm); A/TG = sawdust/coarse tezontle (6-12 mm); CK = concentration of potassium in the nutrient solution of contribution; ddt = days after transplant.

celulares de las fibras del aserrín tienen CIC alta (Marschner, 2012). Independientemente del tamaño de partícula del sustrato, la concentración de Ca en el agua lixiviada fue similar a su concentración en la SN de aporte previo a los 40 ddt; posteriormente, en la mezcla aserrín/tezontle fino, la concentración de Ca aumentó, debido a un efecto de concentración por la disminución en el porcentaje de drenaje en este sustrato. Una concentración de Ca inferior a 100 mg L^{-1} , como en los muestreos 10, 15 y 30 ddt al aplicar la SN con 2 dS m^{-1} , puede conducir a deficiencias de Ca en tomate (Urrestarazu, 2004; Jones, 2005) ya que el Ca en el extracto del sustrato debe superar 200 mg L^{-1} (Abad

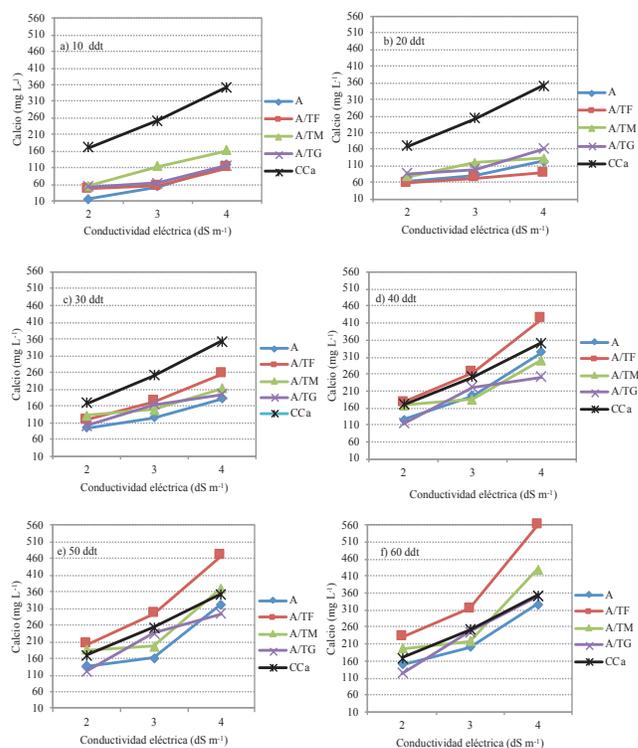


Figura 4. Efecto del sustrato y de la conductividad eléctrica en la solución nutritiva sobre la concentración de calcio en el agua lixiviada durante 60 días después del trasplante de plantas de jitomate. A = aserrín; A/TF = aserrín/tezontle fino (≤ 3 mm); A/TM = aserrín/tezontle mediano (3-6 mm); A/TG = aserrín/tezontle grueso (6-12 mm); Cca = concentración de calcio en la solución nutritiva de aporte; ddt = días después del trasplante.

Figure 4. Effect of the substrate and nutrient solution electrical conductivity on calcium concentration in leached water for 60 days after transplant of tomato plants. A = sawdust; A/TF = fine sawdust/tezontle (≤ 3 mm); A/TM = sawdust/medium tezontle (3-6 mm); A/TG = sawdust/coarse tezontle (6-12 mm); Cca = concentration of calcium in the nutrient solution of contribution; ddt = days after transplant.

et al., 2005). La concentración de Ca fue adecuada cuando el riego se realizó con SN a concentración total de 30 y 40 meq L^{-1} (3 y 4 dS m^{-1}) a partir de los 40 ddt (Figura 4).

Efecto del Sustrato sobre la Concentración de Nutrientos en el Agua Lixiviada

El efecto del sustrato sobre la concentración de N, P, K y Ca en el agua lixiviada se muestra en los Cuadros 3, 4, 5 y 6. Se observa un aumento en la concentración de N, P y Ca a través del tiempo (10 a 60 ddt) en todos los sustratos, pero el K no mostró una tendencia definida

Cuadro 3. Efecto del sustrato y de la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva sobre la concentración de nitrógeno (mg L⁻¹) en el agua lixiviada durante dos meses de crecimiento de plantas de jitomate.**Table 3. Effect of the substrate and nutrient solution electrical conductivity (EC) on nitrogen concentration (mg L⁻¹) in the leached water during two months of tomato plant growth.**

Factor	Días después del trasplante (ddt)					
	10	20	30	40	50	60
Sustrato:						
Aserrín solo	142 b	187 b	220 b	251 b	272 b	299 b
Aserrín/tezontle fino [†]	158 ab	180 bc	265 a	384 a	333 a	354 a
Aserrín/tezontle mediano [‡]	168 a	207 a	225 b	242 b	256 bc	269 c
Aserrín/tezontle grueso [§]	134 b	174 c	227 b	226 c	245 c	294 b
DNHS	19.80	7.56	21.42	18.10	17.3	17.8
CE (dS m ⁻¹):						
2 (175 mg L ⁻¹ de N)	67 c	83 c	95 c	110 c	134 c	149 c
3 (308 mg L ⁻¹ de N)	147 b	175 b	229 b	244 b	266 b	320 b
4 (448 mg L ⁻¹ de N)	139 a	302 a	379 a	415 a	450 a	443 a
DMSH	17.6	15.9	16.8	16.3	15.7	16.2

Medias de columna con la misma letra, no son diferentes estadísticamente (Tukey $P \leq 0.05$). Diámetro de partículas: $\leq 3^{\dagger}$, 3-6[‡], 6-12[§] mm. DMSH = diferencia mínima significativa honesta.

Column means with the same letter are not statistically different (Tukey $P \leq 0.05$). Particle diameter: $\leq 3^{\dagger}$, 3-6[‡], 6-12[§] mm. DMSH = honest minimum significant difference.

Cuadro 4. Efecto del sustrato y de la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva sobre la concentración de fósforo (mg L⁻¹) en el agua lixiviada durante dos meses de crecimiento de plantas de jitomate.**Table 4. Effect of the substrate and nutrient solution electrical conductivity (EC) on phosphorus concentration (mg L⁻¹) in leached water during two months of tomato plant growth.**

Factor	Días después del trasplante (ddt)					
	10	20	30	40	50	60
Sustrato:						
Aserrín	2.1 a	9.8 ab	17.2 b	26.6 b	35.8 b	52.2 b
Aserrín/tezontle fino [†]	1.7 a	9.1 a	18.3 ab	28.1 b	36.2 b	54.2 b
Aserrín/tezontle mediano [‡]	1.6 a	8.3 b	17.7 ab	28.2 b	43.5 a	64.4 a
Aserrín/tezontle grueso [§]	1.8 a	11.1 a	23.4 a	33.2 a	42.5 ab	60.8 a
DNHS	2.11	1.65	5.76	3.96	7.1	6.25
CE (dS m ⁻¹):						
2 (46 mg L ⁻¹ de P)	1.7 a	7.4 c	13.3 b	18.6 c	30.3 c	42.5 c
3 (62 mg L ⁻¹ de P)	1.8 a	9.9 b	20.8 a	32.3 b	38.8 b	47.6 b
4 (93 mg L ⁻¹ de P)	2.1 a	11.5 a	23.5 a	36.2 a	49.5 a	83.5 a
DMSH	1.64	1.29	4.51	3.11	5.53	4.90

Medias de columna con la misma letra, no son diferentes estadísticamente (Tukey $P \leq 0.05$). Diámetro de partículas: $\leq 3^{\dagger}$, 3-6[‡], 6-12[§] mm. DMSH = diferencia mínima significativa honesta.

Column means with the same letter are not statistically different (Tukey $P \leq 0.05$). Particle diameter: $\leq 3^{\dagger}$, 3-6[‡], 6-12[§] mm. DMSH = honest minimum significant difference.

Cuadro 5. Efecto del sustrato y de la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva sobre la concentración de potasio (mg L⁻¹) en el agua lixiviada durante dos meses de crecimiento de plantas de jitomate.

Table 5. Effect of substrate and nutrient solution electrical conductivity (EC) on potassium concentration (mg L⁻¹) in leached water during two months of tomato plant growth.

Factor	Días después del trasplante (ddt)					
	10	20	30	40	50	60
Sustrato:						
Aserrín	434 a	373 a	365 a	358 b	373 b	426 a
Aserrín/tezontle fino [†]	397 b	380 a	351 a	392 ab	364 b	422 a
Aserrín/tezontle mediano [‡]	362 c	360 a	368 a	377 ab	416 a	460 a
Aserrín/tezontle grueso [§]	398 b	374 a	386 a	396 a	421 a	438 a
DNHS	25.74	21.80	38.50	32.80	32.70	42.90
CE (dS m ⁻¹):						
2 (273 mg L ⁻¹ de K)	286 c	285 c	276 c	269 c	307 c	340 c
3 (383 mg L ⁻¹ de K)	366 b	359 b	370 b	381 b	402 b	425 b
4 (531 mg L ⁻¹ de K)	541 a	472 a	457 a	493 a	494 a	543 a
DMSH	12.40	19.30	16.6	20.10	17.80	18.1

Medias de columna con la misma letra, no son diferentes estadísticamente (Tukey $P \leq 0.05$). Diámetro de partículas: $\leq 3^\dagger$, 3-6[‡], 6-12[§] mm. DMSH = diferencia mínima significativa honesta.

Column means with the same letter are not statistically different (Tukey $P \leq 0.05$). Particle diameter: $\leq 3^\dagger$, 3-6[‡], 6-12[§] mm. DMSH = honest minimum significant difference.

Cuadro 6. Efecto del sustrato y de la conductividad eléctrica (EC) de la solución nutritiva sobre la concentración de calcio (mg L⁻¹) en el agua lixiviada durante dos meses de crecimiento de plantas de jitomate.

Table 6. Effect of substrate and nutrient solution electrical conductivity (EC) on calcium concentration (mg L⁻¹) in leached water during two months of tomato plant growth.

Factor	Días después del trasplante (ddt)					
	10	20	30	40	50	60
Sustrato:						
Aserrín	62 b	89 b	134 c	215 b	206 c	226 d
Aserrín/tezontle fino [†]	71 b	73 c	183 a	288 a	322 a	369 a
Aserrín/tezontle mediano [‡]	111 a	109 a	165 ab	219 b	251 b	282 b
Aserrín/tezontle grueso [§]	77 b	116 a	153 bc	195 c	217 c	240 c
DNHS	17.3	7.30	25.30	12.6	25.20	10.70
CE (dS m ⁻¹):						
2 (170 mg L ⁻¹ de Ca)	43 c	72 c	112 c	146 c	161 c	176 c
3 (252 mg L ⁻¹ de Ca)	71 b	93 b	153 b	217 b	222 b	245 b
4 (352 mg L ⁻¹ de Ca)	126 a	126 a	211 a	325 a	364 a	417 a
DMSH	5.7	6.10	19.80	9.80	19.80	18.40

Medias de columna con la misma letra, no son diferentes estadísticamente (Tukey $P \leq 0.05$). Diámetro de partículas: $\leq 3^\dagger$, 3-6[‡], 6-12[§] mm. DMSH = diferencia mínima significativa honesta.

Column means with the same letter are not statistically different (Tukey $P \leq 0.05$). Particle diameter: $\leq 3^\dagger$, 3-6[‡], 6-12[§] mm. DMSH = honest minimum significant difference.

en la mayoría de las fechas de muestreo (Cuadro 5). La mayor concentración de N (Cuadro 3) y Ca (Cuadro 6) a partir de los 30 ddt, fue encontrada en el agua lixiviada de la mezcla aserrín/tezontle fino, en la cual se tuvo menor volumen de agua drenada.

Efecto de la Conductividad Eléctrica (CE) de la Solución Nutritiva en la Concentración de Nutrientes en el Agua Lixiviada

En los Cuadros 3, 4, 5 y 6 se muestra el efecto de la CE en la concentración de N, P, K y Ca en el agua lixiviada. En general, se observa que los riegos con la solución nutritiva con la CE más alta (4 dS m^{-1}), se asoció con la concentración más alta de nutrientes en el agua lixiviada en cada fecha de muestreo, excepto N a los 10 ddt; esto indica que la SN con 40 meq L^{-1} aporta más nutrientes que los absorbidos por la planta y los inmovilizados por los microorganismos o retenidos por el sustrato (Silber, 2008).

Variación del pH en el agua lixiviada. En la Figura 5 se observa que partiendo de un pH de 6 de la SN, hubo un aumento gradual en el pH del agua lixiviada durante las tres primeras semanas, alcanzando valores hasta 8.6. Del día 21 al 45 hubo un período de estabilización, pero posterior a ello, el pH disminuyó hasta valores de 6.6 a 7.4 entre los diferentes tratamientos. En general, no hubo diferencia significativa de pH entre tratamientos durante los primeros 45 ddt, pero posteriormente los tratamientos con mayor CE (4 dS m^{-1}) presentaron los valores más bajos de pH, mientras que la menor CE (2 dS m^{-1}) generó poca variación en pH del agua lixiviada. La disminución del pH durante la descomposición inicial de los residuos orgánicos se atribuye al consumo de H^+ para formar amoníaco (NH_3) y amonio (NH_4^+) (Handreck y Black, 2005), pero posteriormente durante la nitrificación (formación de NO_3^-) se liberan todos los H^+ y el pH disminuye (Somerville *et al.*, 2014).

Variación de la conductividad eléctrica (CE) en el agua lixiviada. La disminución significativa en la CE del agua lixiviada en el período inicial en todos los tratamientos, indica una alta tasa de inmovilización de nutrientes por la población microbiana (Brady y Weil, 2002; Havlin *et al.*, 2005). Después de eso hubo un aumento gradual durante los primeros 21 ddt

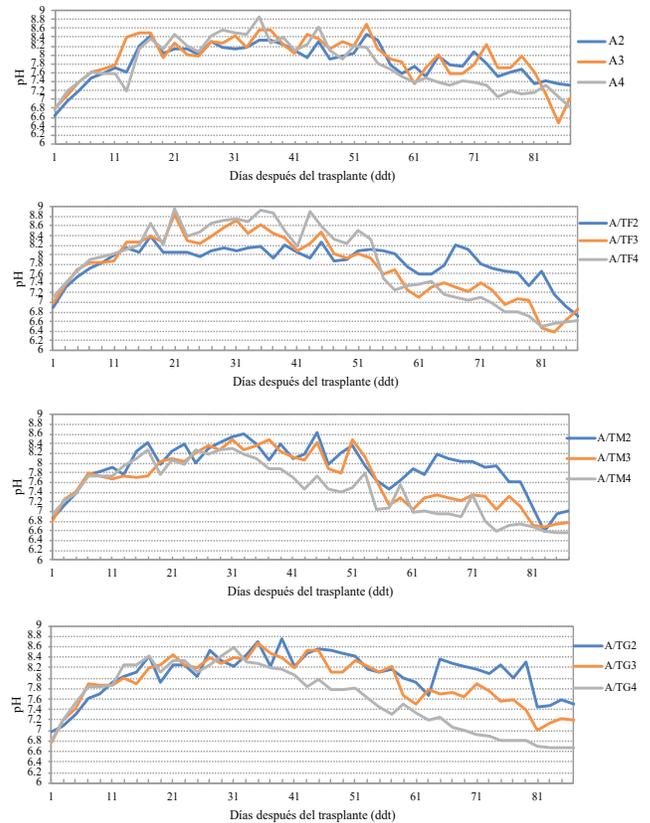


Figure 5. Variación del pH en el lixiviado de diferentes sustratos regado con solución nutritiva con diferente conductividad eléctrica (dS m^{-1}) durante 87 días después del trasplante de plantas de jitomate. A = aserrín; A/TF = aserrín/tezontle fino ($\leq 3 \text{ mm}$); A/TM = aserrín/tezontle mediano (3-6 mm); A/TG = aserrín/tezontle grueso (6-12 mm). 2, 3, 4 conductividad eléctrica (dS m^{-1}).

Figure 5. Variation in pH in leachate of different substrates irrigated with nutrient solution with different electrical conductivity (dS m^{-1}) during 87 days after transplant of tomato plants. A = sawdust; A/TF = fine sawdust / tezontle ($\leq 3 \text{ mm}$); A/TM = sawdust/medium tezontle (3-6 mm); A/TG = sawdust/coarse tezontle (6-12 mm). 2, 3, 4 electrical conductivity (dS m^{-1}).

alcanzando valores de hasta 2, 3 y 3.5 dS m^{-1} para las soluciones de 20, 30 y 40 meq L^{-1} , respectivamente. A partir de los 21 ddt, la CE varió de 2 a 2.5, de 2.5 a 3, y de 3 a 4 dS m^{-1} cuando se utilizaron SN de 20, 30, y 40 meq L^{-1} , respectivamente. En general, cuanto mayor fue la concentración de la SN, mayor fue la CE del agua lixiviada, observándose mayor CE en la mezcla aserrín/tezontle fino, especialmente cuando la solución nutritiva contenía 40 meq L^{-1} (Figura 6).

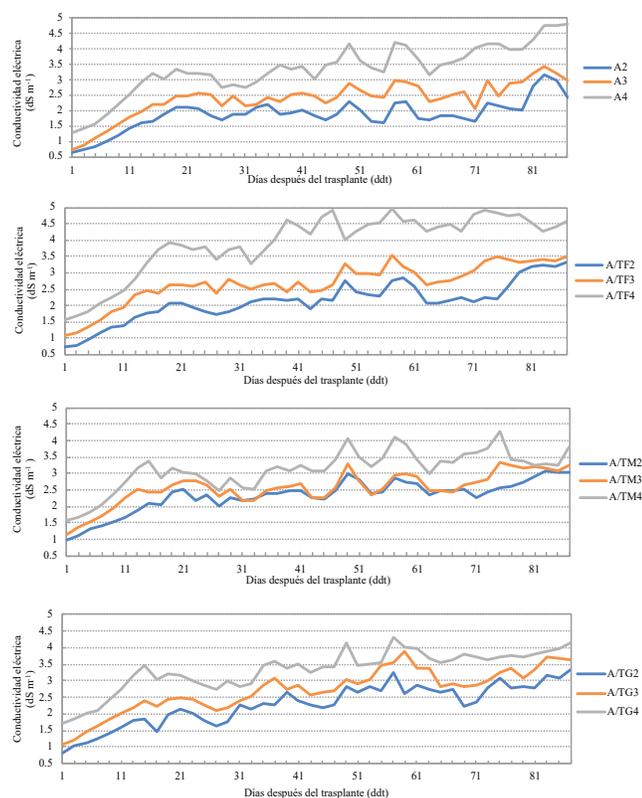


Figura 6. Variación de la conductividad eléctrica del lixiviado de diferentes sustratos regados con soluciones nutritivas con diferente conductividad eléctrica (dS m^{-1}) durante 87 días después del trasplante de jitomate. A = aserrín; A/TF = aserrín/tezontle fino (≤ 3 mm); A/TM = aserrín/tezontle mediano (3-6 mm); A/TG = aserrín/tezontle grueso (6-12 mm). 2, 3, 4 conductividad eléctrica (dS m^{-1}).

Figure 6. Variation in electrical conductivity of the leachate of different substrates irrigated with nutritive solutions with different electrical conductivity (dS m^{-1}) during 87 days after tomato transplant. A = sawdust; A/TF = fine sawdust/tezontle (≤ 3 mm); A/TM = sawdust/medium tezontle (3-6 mm); A/TG = sawdust/coarse tezontle (6-12 mm). 2, 3, 4 electrical conductivity (dS m^{-1}).

CONCLUSIONES

- El aserrín de pino solo o en mezclas aserrín/tezontle 70/30 v/v con cultivo de jitomate presentaron inmovilización neta de N y retención de P y Ca en el sustrato durante los primeros 60 días después del trasplante (ddt) al aplicar una solución nutritiva de 2 dS m^{-1} , mientras que las soluciones nutritivas de 3 y 4 dS m^{-1} suministraron la demanda de estos nutrientes, a partir de los 40 y 30 ddt, respectivamente.

- La concentración de K en la solución del sustrato fue directamente proporcional a la concentración de este nutriente en las soluciones nutritivas aportadas, no se encontraron evidencias de inmovilización de K por los microorganismos, pero hubo una ligera retención por el sustrato en los primeros 30 ddt. El aserrín de pino solo o en mezclas aserrín/tezontle 70/30 (v/v) sin compostaje, constituye un sustrato adecuado para cultivo de jitomate si se aplica una solución nutritiva con la concentración de N, P, K y Ca que cubra la demanda de la planta y los requerimientos de inmovilización o retención por el sustrato durante 60 ddt, lo que se satisfizo con 30 y 40 meq L^{-1} (3 y 4 dS m^{-1}) considerando el equilibrio nutricional de la solución nutritiva universal de Steiner.

LITERATURA CITADA

- Abad, B. M., P. Noguera y C. Carrión. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. Capítulo 8. pp. 299-354. In: C. Cadahia L. (ed.). Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales. Mundi-Prensa. Madrid, España. ISBN: 8484762475, 9788484762478.
- Aguilera R., M., A. Aldrete, T. Martínez y V. M. Ordaz. 2016. Producción de *Pinus pseudostrobus* Lindl. con sustratos de aserrín y fertilizantes de liberación controlada. Rev. Mex. Cienc. For. 7: 7-20.
- Barbazán, M., A. del Pino, C. Moltini, J. Hernández y J. Rodríguez. 2011. Caracterización de materiales orgánicos aplicados en sistemas agrícolas intensivos de Uruguay. Agrociencia Uruguay 15: 82-92.
- Brady, N. C. and R. R. Weil. 2002. The nature and properties of soils. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Capistrán, F., E. Aranda y C. J. Romero. 1999. Manual de reciclaje, compostaje y lombricompostaje. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Veracruz, México.
- Contin, M., M. de Nobill, and C. Cattivello. 2008. Mineralization/immobilization of nitrogen and phosphorous in composted growing media. Acta Hort. 779: 599- 605. doi: 10.17660/ActaHortic.2008.779.77.
- Etchevers B., J., G. Goiberg, R. M. López R., J. Padilla, J. Alvarado, C. Hidalgo M., Ma. L. Cruz H., A. Guerrero P., B. Gutiérrez y E. Miranda C. 2000. Manual de procedimientos analíticos para análisis de suelos y plantas del laboratorio de fertilidad de suelos. IRENAT-Colegio de Posgraduados, Montecillo. Texcoco, Estado de México, México.
- Gruda, N. and W. H. Schnitzler. 2004. Suitability of wood fiber substrate for production of vegetable transplants.1 Physical properties of wood fiber substrates. Sci. Hortic. 100: 309-322. doi:10.1016/j.scienta.2003.10.001.
- Gayosso R., S., E. Villanueva C., M. A. Estrada, B. y R. Garruña. 2018. Caracterización físico-química de mezclas de residuos orgánicos utilizados como sustratos agrícolas. Bioagro 30: 179-190.

- Handreck, K. A. and N. D. Black. 2005. Growing media for ornamental plants and turf. UNSW Press. Kensington, Australia.
- Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale, and W. L. Nelson. 2005. Soil fertility and fertilizer. Pearson and Prentice-Hall. New York, NY, USA. ISBN: 0-13-027824-6.
- Jackson, B. E., R. D. Wright, and M. C. Barnes. 2008. Pine tree substrate, nitrogen rate, particle size, and peat amendment affect poinsettia growth and substrate physical properties. HortScience 43: 2155- 2161. doi: 10.21273/HORTSCI.43.7.2155.
- Jones, J. B. 2005. Hydroponics: A practical guide for the soilless grower. CRC Press. Boca Raton, FL, USA. ISBN: 9780849331671.
- Marschner, P. 2012. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. London, UK. ISBN: 978-0-12-473542-2.
- Mateo S., J. J., J. Capulín, M. R. Araujo, A. Suárez y B. Mitjans. 2014. Crecimiento de *Acacia retinodes* Schlttdl. en sustratos a base de aserrín de pino y envases tratados con cobre. Rev. Cubana Cienc. For. 2: 191-202.
- Ogden, R. J., F. A. Pokorny, H. A. Mills, and M. G. Dunavent. 1987. Elemental status of pine bark-based potting media. Hortic. Rev. 9: 103-131. doi: 10.1002/9781118060827.ch4.
- Ojodeagua A., J. L., J. Z. Castellanos R., J. J. Muñoz R., G. Alcántar G., L. Tijerina CH., P. Vargas T. y S. Enríquez R. 2008. Eficiencia de suelo y tezontle en sistemas de producción de tomate en invernadero. Rev. Fitotec. Mex. 31: 367-374.
- Parks, S., S. Newman, and J. Golding. 2004. Substrate effects on greenhouse cucumber growth and fruit quality in Australia. Acta Hort. 648: 129-133. doi: 10.17660/ActaHortic.2004.648.15.
- Pineda, P. J., A. Ramírez A., F. Sánchez, F. Sánchez del C., A. M. Castillo G., L. A. Valdez A., and J. M. Vargas C. 2011. Extraction and nutrient efficiency during vegetative growth of tomato under hydroponic conditions. Acta Hort. 893: 997-1005. doi: 10.17660/ActaHortic.2011.893.112.
- Pineda-Pineda, J., F. Sánchez del C., A. Ramírez-Arias, A. M. Castillo-González, L. A. Valdés-Aguilar y E. C. Moreno-Pérez. 2012. Aserrín de pino como sustrato hidropónico. I: Variación en Características físicas durante cinco ciclos de cultivo. Rev. Chapingo Ser. Hortic. 18: 95-111.
- Prasad, M. and M. J. Maher. 2004. Stability of peat alternatives and use of moderately decomposed peat as a structure builder in growing media. Acta Hort. 648: 145- 151. doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2004.648.17.
- Raviv, M. and J. H. Lieth. 2008. Soilless culture: Theory and practice. Elsevier Science. St. Louis, MO, USA.
- Resh, H. M. 2001. Cultivos hidropónicos. Nuevas técnicas de producción. Mundi Prensa. España.
- SAS Institute. 1998. SAS/STAT guide for personal computers. Version 8. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Silber, A. 2008. Chemical characteristics of soilless media. pp. 113-148. In: M. Raviv and J. H. Lieth (eds.). Soilless culture: Theory and practice. Elsevier Science. St. Louis, MO, USA.
- Somerville, C., M. Cohen, E. Pantanella, A. Stankus, and A. Lovatelli. 2014. Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. Rome, Italy.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. pp. 663-649. In: Proceeding sixth International Congress on Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands.
- Vargas, J. M., A. M. Castillo G., J. Pineda P., J. A. Ramírez A. y E. Avitia G. 2014. Extracción nutrimental de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. Rev. Chapingo Ser. Hortic. 20: 71-88.
- Urrestarazu G., M. 2004. Tratado de cultivo sin suelo. Mundi Prensa. España. ISBN: 8484761398, 9788484761396.