

EVALUACIÓN DE LA MORFOLOGÍA CUANTITATIVA Y CAPACIDAD DE PENETRACIÓN DE RAÍCES DE CROTALARIA (*Crotalaria juncea* L.) Y GIRASOL (*Helianthus annuus* L.)

Evaluation of root quantitative morphology and penetration ability in sun hemp (*Crotalaria juncea* L.) and sunflower (*Helianthus annuus* L.)

María S. Ferrarotto S., Yormarit Otaiza

Departamento de Botánica Agrícola. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela.

Facultad de Agronomía. El Limón. Apartado postal 5947. Maracay. Edo. Aragua. Venezuela.

ferrarottom@agr.ucv.ve

Resumen

Se compara la morfología cuantitativa del sistema radical de crotalaria (*Crotalaria juncea* L.) y girasol (*Helianthus annuus* L.), en presencia de capas compactadas, en la búsqueda de diferencias entre estas especies, que podrían ser un reflejo de su capacidad para la penetración como una característica importante para su desarrollo en suelos con limitaciones físicas debidas a la compactación y déficit hídrico. Se utilizó el método de discos de parafina y un lote de 25 plantas de cada especie y un diseño experimental aleatorio, con cinco tratamientos de impedancia mecánica a 23 °C. Se determinó el índice de penetración de raíces, longitud, volumen, diámetro y superficie del sistema radical, longitud radical específica, superficie radical específica y materia seca total de la raíz y el vástago, por planta. 28 días después de la siembra, en ausencia del disco PV, la longitud total promedio del sistema radical fue mayor en crotalaria que en girasol; en ambas especies, el mayor número de raíces se presentó de 0 a 5 cm de profundidad. Crotalaria presentó el mayor IPR, incremento en el diámetro promedio de las raíces y cambios en el volumen radical en respuesta a incrementos en la impedancia mecánica. El girasol reflejó mayor susceptibilidad de las raíces a la impedancia mecánica presentando disminución de la superficie radical, menor número de raíces y raíces más superficiales.

Palabras clave: crotalaria, *Crotalaria juncea*, raíces, girasol, *Helianthus annuus*, impedancia mecánica.

Abstract

The quantitative morphology of the root system of sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.) and sunflower (*Helianthus annuus* L.) is compared in presence of wax layers, to evaluate species differences in root penetration ability as an important character against physic soil limitation as compaction and water stress. The wax layers method and a set of 25 plants of each species were established under a random design with five treatments with PV layers at 23 °C. Root penetration index, length, volume, diameter and root surface, specific root length, specific root surface, root and shoot dry matter per plant were determined. 28 days after sowing, total mean length of the root system was higher in sunn hemp than sunflower, without PV disc. In both species a higher number of roots were distributed from 0 to 5 cm depth. Crotalaria showed a higher IPR, an increment in the mean root diameter and changes in root volume in response to the mechanical impedance. Sunflower showed higher root susceptibility to mechanical impedance with a lower root surface, less number of root and shallower roots.

Key words: compaction, *Crotalaria juncea*, *Helianthus annuus*, mechanical impedance, sunflower, sunn hemp, roots.

Introducción

El desarrollo de las raíces es el resultado de la interacción compleja entre factores internos y externos (principalmente asociados a características físicas del suelo) (Acuña & Wade 2013), que generan un patrón de crecimiento, topología y morfología que podrían limitar la expresión de su potencial genético, afectando negativamente el rendimiento de la planta (Ohep *et al.* 2002).

Uno de estos factores físicos es la porosidad del suelo, la cual disminuye en suelos compactados y secos (Kubo *et al.* 2004), afectando la absorción de agua y nutrimentos por las raíces (Castro 2007). En este sentido, se ha señalado que la capacidad de las especies para desarrollarse en condiciones de suelos con capas compactadas difiere entre ellas (Casanova 2005; Montagu *et al.* 2001) y pueden ser características consideradas en el mejoramiento genético de las plantas (Kubo *et al.* 2004). A nivel de Venezuela, casi todas las unidades de producción están bajo cultivos anuales mecanizados y las capas compactadas están entre 8 a 12 cm en el suelo, lo que constituye un problema de degradación de los suelos que afecta su rendimiento. Por ello, es necesario estudiar la respuesta de especies vegetales de interés agrícola a la presencia de capas compactadas, como en la presente investigación, en la que se usó el método de discos de parafina-vaselina (Kubo *et al.* 2004) en condiciones controladas.

En el caso de crotalaria (*Crotalaria juncea*

L.), la literatura refiere que es una planta tropical con un buen desarrollo radicular (Peñaloza & Peláez 2008) y poco sensible a la compactación (Gerster *et al.* 2006), mientras que girasol (*Helianthus annuus* L.) es una especie sensible a suelos pesados o compactados los cuales causan deformaciones de sus raíces y restringen su desarrollo. Respecto a los sistemas de siembra, se ha referido que en siembra directa predominan raíces superficiales con un patrón de crecimiento horizontal y en siembra convencional, la profundidad radical es mayor (Sadras *et al.* 1989).

En este sentido, los valores críticos de la densidad aparente para el crecimiento de las raíces en general, varían según la textura del suelo y la especie vegetal, siendo la máxima presión que pueden ejercer las raíces para desarrollarse satisfactoriamente de 0,9 y 1,5 MPa (Bowen 1981). En el caso de girasol, los suelos arenosos con una densidad aparente de 1.759 kg m⁻³ limita su crecimiento, mientras que en suelos arcillosos, el valor crítico para la misma especie es de 1.460 a 1.630 kg m⁻³ (Jones *et al.* 1991).

Por lo antes expuesto, la presente investigación se planteó como objetivo estudiar aspectos de la morfología cuantitativa del sistema radical de crotalaria y girasol con el fin de comparar las respuesta en términos de capacidad de penetración de raíces sometidas a diferentes grados de impedancia mecánica generada por capas compactadas representadas por discos de parafina-vaselina, en condiciones

controladas. Todo ello en virtud de evaluar, si la capacidad de penetración de las raíces en estas especies, es la característica que determina su crecimiento en suelos compactados, como en el caso de crotalaria o la susceptibilidad para desarrollarse en suelos de baja porosidad y déficit hídrico, como el caso de girasol.

Materiales y métodos

El ensayo se llevó a cabo en el invernadero de docencia de la Cátedra de Fisiología Vegetal, Facultad de Agronomía, de la Universidad Central de Venezuela; localizado en Maracay, distrito Girardot, Municipio Mario Briceño Iragorry, estado Aragua a 67° 37" de longitud oeste, 10° 17" de latitud norte y a una altitud de 45 m s.n.m. Se utilizaron semillas de crotalaria provenientes del depósito de la Cátedra de Fisiología Vegetal de la Facultad de Agronomía de la UCV y semillas de girasol de la empresa Agro Patria, ubicada en la localidad de Cagua, Estado Aragua.

Tanto para crotalaria como para girasol se realizó la siembra en un semillero para un total de 25 recipientes y 75 semillas de cada especie, que consistió en colocar tres semillas por cada recipiente plástico de 100 mL de capacidad. El sustrato del semillero consistió en arena de río lavada, previamente cernida, descarboxada y desinfectada con HCl al 1%. El riego consistió en aplicar 50 mL de agua destilada diariamente a cada vaso.

Elaboración y composición de los discos de parafina-vaselina (PV)

Los discos PV representan en este estudio una barrera física de dureza variable,

que genera una impedancia mecánica a la penetración de raíces. Se elaboraron según la metodología propuesta por Kubo *et al.* (2004), fundiendo parafina líquida y vaselina de uso comercial en baño de María a diferentes proporciones, obteniéndose 30, 50, 70 y 100 PV en los cuales, 30 PV corresponde a 30% de parafina y 70% de vaselina, y así respectivamente. Una vez sacadas del baño, la mezcla fundida fue vertida dentro de moldes cuadrados de cartón de 10x10 cm colocados sobre una superficie nivelada para obtener cuadrados de un espesor de 0,3 cm y se dejaron solidificar. Posteriormente, con ayuda de un bisturí las capas se recortaron en forma circular para obtener discos de 5cm de diámetro en cuyo centro se abrió un orificio de 0,4 cm para el drenaje. En el tratamiento testigo, no se colocó disco PV y se identificó como 00:00. Adicionalmente, una serie de discos fueron elaborados para la determinación de la resistencia a la penetración o impedancia mecánica de cada una de ellas utilizando un penetrómetro de bolsillo (CL-700 Soiltesty INC) de punta plana y 0,6 cm de diámetro. La determinación se realizó en seis puntos de cada capa, para luego obtener un valor promedio en mm de penetración, que se transformaron a MPa.

Tratamientos

Se establecieron cinco tratamientos, en el cuadro 1 se muestra la proporción parafina-vaselina (PV) en los discos de cada tratamiento: T₀:0PV (ausencia de capas); T₁:30PV, T₂:50PV, T₃:70PV y T₄:100:00 PV, con cinco repeticiones cada uno y la resistencia mecánica que

Cuadro 1. Proporción de parafina-vaselina (PV) en los tratamientos aplicados a plantas de crotalaria (*C. juncea*) y girasol (*H. annuus*) e impedancia mecánica (MPa) generada en cada uno de ellos.

Tratamientos Proporción PV	Resistencia (MPa)
T ₀ (00:00)	0
T ₁ (30:70)	0,075-0,175
T ₂ (50:50)	0,175-0,225
T ₃ (70:30)	0,225-0,275
T ₄ (100:00)	0,45

representa cada uno de ellos en unidades de presión. Se estableció un total de cincuenta contenedores con una planta cada uno, para un total de 25 plantas crotalaria y 25 de girasol que se distribuyeron bajo un diseño completamente aleatorio.

Transplante de plántulas y montaje de los discos PV

Una vez que la radícula de las plántulas de ambas especies alcanzaron los 4 cm de longitud se transplantaron a cilindros plásticos transparentes de 10 cm de altura y 6,5 cm de diámetro. Según el tratamiento, los discos de resistencia mecánica conocida, se colocaron a 5 cm de altura desde la base dentro de cada cilindro rodeados por el substrato, que consistió en arena descarbonatada y desinfectada. A partir del transplante, los cilindros se forraron con papel de aluminio para evitar la proliferación de algas y se colocaron sobre una base o plato plástico. EL riego se realizó con agua destilada, hasta 15 días después del transplante y luego se procedió a regar, cada dos días, con solución nutritiva Hoagland II preparada con 18-18-18.

Muestreo. En ambas especies se realizó un único muestreo a los 28 días después de la

siembra. Se separó la raíz del vástago de cada planta, siendo el tamaño de la muestra de n=5 para cada variable y tratamiento. El vástago de cada muestra se llevo a estufa a 70° C durante 48 horas para determinar su peso seco. La raíz se utilizó para la determinación de las variables objeto de esta investigación, como se indica a continuación.

La raíz de cada planta se dividió en dos partes correspondientes a dos porciones iguales del cilindro de 5 cm de profundidad cada una, ubicadas por encima y por debajo del disco PV.

Las raíces se lavaron con agua destilada y se conservaron en etanol al 20% bajo refrigeración hasta el momento de las determinaciones, para lo cual se rehidrataron sumergiéndolas durante 15 minutos en alcohol al 10% y luego en agua destilada. Para facilitar las determinaciones se tiñeron sumergiéndolas en safranina al 0,05% por 5 minutos. Se contó el número total de raíces y el número de raíces que penetraron el disco PV, a fin de determinar el Índice de Penetración de Raíces (IPR): calculado como el número de raíces que penetraron el disco PV por el total de raíces por planta⁻¹. Así mismo, se

determinó la longitud del sistema radical, extendiendo las raíces sobre una bandeja de vidrio cuadrada 1x1cm, ocupando un área total de 1200 cm² y contando el número de intercepciones de las raíces con la cuadrícula (Tennant 1975), aplicando la relación: $L = 11/14 \times 1\text{cm} \times \text{número de intercepciones totales}$. El volumen de raíces (cm³) se determinó sumergiendo las raíces en un cilindro graduado conteniendo un volumen conocido de agua y registrando el volumen desplazado (mL). El diámetro (D) de raíces (cm) se determinó mediante la relación: $D = (4 \times V / \pi \times L)^{1/2}$, y la superficie del sistema radical (cm²): $(S) = \pi \times D \times L$. Por otra parte, se calculó la superficie radical específica (SRE): $SRE = S \times \text{peso seco de raíces}^{-1}$ y la longitud radical específica (LRE): $LRE = L \times \text{peso seco de raíces}^{-1}$. Una vez concluida la determinación de todas las variables, las raíces se llevaron a estufa a 70°C durante 48 horas para determinar el peso seco total de raíz por planta.

Análisis estadístico

Una vez obtenidos los resultados en ambas especies, se realizó la prueba de normalidad para cada variable, utilizando el programa Statistix versión 8.0. Las variables que se distribuyeron normalmente fueron: superficie radical específica, longitud radical específica y número de raíces totales, se realizó la prueba de varianza de Wilks Shapiro, que arrojó diferencias significativas entre especies y entre tratamientos, pero no en la interacción. En función de esto, se realizó la prueba de normalidad para las dos especies bajo estudio, por separado.

Para *C. juncea*, las variables que se distribuyeron normalmente fueron: longitud radical total, número de raíces totales, peso del vástago, materia seca (peso del vástago + peso de raíz), superficie radical específica y longitud radical específica. Se realizó la prueba de varianza de Wilks Shapiro, encontrándose que para las variables superficie radical específica, longitud radical específica y volumen total radical, no hubo diferencias significativas. El número de raíces totales, peso del vástago y materia seca total difirieron significativamente. Al analizar todos los tratamientos contra el testigo, aplicando la prueba de media de Dunnett, se encontró que las variables superficie radical específica, materia seca total y volumen total, no arrojaron diferencias significativas, mientras que la longitud radical específica, longitud total, número de raíces totales y peso del vástago sí mostraron diferencias significativas.

En el caso de *H. annuus*, las variables que se distribuyeron normalmente fueron: superficie radical específica, longitud radical específica, peso del vástago, materia seca total (peso del vástago + peso raíz) y volumen radical. A estas variables se les aplicó la prueba de varianza de Wilks Shapiro, que no arrojó diferencias entre los tratamientos debido a la presencia de capas PV en esta especie, a excepción de la longitud radical específica. Al analizar todos los tratamientos contra el testigo aplicando la prueba de medias de Dunnett, no se encontraron diferencias para las variables superficie radical específica, número de raíces totales, peso del vástago, materia seca total, volumen radical,

mientras que la longitud radical específica difirió estadísticamente.

Por último, para las variables que no cumplieron con la prueba de normalidad, se realizó la prueba de varianza de Kruskal Wallis seguida por un análisis no paramétrico.

Resultados y discusión

El crecimiento de las raíces puede interpretarse como el resultado de un proceso complejo en el que actúan un conjunto de presiones que se ejercen en diferentes sentidos a fin de vencer la resistencia impuesta por el medio de crecimiento (Montagu *et al.* 2001). En la presente investigación, la impedancia mecánica que ofrecieron los discos PV fue de 0 en el tratamiento testigo (sin disco PV) y se incrementó desde 0,075 MPa en 30:70 PV hasta 0,450 MPa en 100:00 PV, que podrían considerarse dentro del rango de las presiones ejercidas por las raíces para su crecimiento. Se ha señalado que la presión máxima que ejerce una raíz es de 0,7-1,3 MPa en dirección axial y 0,6 MPa en sentido radial (Rosolem *et al.* 2001).

En este sentido, los resultados obtenidos indican que las raíces, tanto de crotalaria como de girasol, que lograron atravesar los discos PV, fueron capaces de vencer la impedancia mecánica en los rangos señalados y penetrar el disco PV cuyas las proporciones parafina-vaselina (PV) en los distintos tratamientos y la resistencia mecánica que representa cada una de ellas en unidades de presión se muestran en el cuadro 1. A este respecto, cabe señalar que un disco 70:30 PV generó una resistencia a la penetración de raíces de 0,33 MPa que

sería comparable a la impedancia mecánica debida a un suelo con una densidad de 1,30-1,35 mg m⁻³ como los de la Serie Maracay. Así mismo, para un suelo de densidad aparente de 1,35-1,70 mg m⁻³ se ha reportado una impedancia de 0,33 MPa (Rosolem *et al.* 2001), es decir las raíces deben generar una presión mayor durante su crecimiento y desarrollo para vencer la presión o resistencia contraria impuesta por el suelo para lograr su penetración y establecimiento.

Por otra parte, un disco 50:50 PV ofreció una impedancia a la penetración de raíces de 0,19-0,87 MPa que sería comparable a la resistencia impuesta por un suelo con una densidad de 1,4-1,6 mg m⁻³ (Nhan *et al.* 2006; Bravo *et al.* 2004). En el mismo contexto, para valores de densidad aparente de 1,19-1,45 mg m⁻³, se ha determinado una resistencia de 1-2 MPa, en suelos Typic Haplustol (Díaz-Zorita 2004). Densidades más altas (1,6-1,7 mg m⁻³), ofrecen una impedancia mecánica a la penetración de raíces de 4,59-6,0 MPa y han sido señaladas para suelos franco arenosos Fluventic Haplustol (Delgado *et al.* 2008), siendo éstas diez veces mayores a las obtenidas con los discos 100:00 PV en la presente investigación, que generó una resistencia de 0,45 MPa.

Índice de penetración de raíces (IPR)

Ambas especies presentaron mayor cantidad de raíces en los primeros 5 cm de profundidad del cilindro, es decir por encima del disco PV. La crotalaria presentó mayor número de raíces en todos los tratamientos (tanto en presencia como en ausencia de discos PV) en comparación

con girasol (Cuadro 2). Estos resultados demuestran que en condiciones de suelos compactados, la crotalaria presenta mayor número de raíces, lo que indica una mayor efectividad en la explotación de los recursos bajo estas condiciones coincidiendo con Materechera *et al.* (1993). A este respecto, se ha señalado que plantas de crotalaria se caracterizan por presentar una raíz que le permite vencer resistencias internas en un perfil de suelo (FAO 2009). En el cuadro 2, se observa que esta especie respondió a la presencia de discos presentando en todos los tratamientos mayor IPR que en el tratamiento testigo, existiendo diferencias estadísticamente significativas entre T_0

(00:00 PV) y T_1 (30:70 PV).

Por otra parte, en ninguno de los tratamientos se observaron raíces de girasol a una profundidad entre 5 y 10 cm. En otras investigaciones con girasol, Peñaloza & Peláez (2008) determinaron que ninguna raíz de esta especie penetra suelos con una densidad aparente mayor o igual a $1,9 \text{ g cm}^{-3}$, siendo $1,47\text{-}1,90 \text{ g cm}^{-3}$ valores limitantes. A este respecto, en la presente investigación, las resistencias fueron menores a las correspondientes a estas densidades, y sin embargo, no se observaron raíces atravesando los discos PV.

Cuadro 2. Valores promedio del Índice de penetración de raíces (IPR), en raíces de crotalaria (*C. juncea*) y girasol (*H. annuus*), en función de la profundidad y la resistencia mecánica impuesta por los discos PV en cada tratamiento con diferentes grados de resistencia mecánica.

Tratamientos Disco PV	Profundidad (cm)	IPR	
		Crotalaria	Girasol
T_0 (00:00)	0 -10	1,00*	1,00
	0 - 5	1,68*	1,12
T_1 (30:70)	5 -10	0,37	0
	0 - 5	1,52	1,25
T_2 (50:50)	5 - 10	0,42	0,66
	0- 5	1,83	1,33
T_3 (70:30)	5 - 10	0,22	0,66
	0- 5	1,60	1,40
T_4 (100:00)	5 -10	0,45	0,20

*Indica diferencias estadísticamente significativas al aplicar la prueba de Dunnett.

Materia seca radical

El cuadro 3 muestra que, en plantas de la misma edad, la materia seca total promedio en raíces de crotalaria fue mayor que para girasol (0,43 y 0,06 g) respectivamente. El contenido de materia seca radical de plantas creciendo en los tratamientos T_0 y T_1 difirió estadísticamente ($p \leq 0,05$) entre los tratamientos con discos PV y el testigo. Estos resultados coinciden con los encontrados en estudios realizados para determinar el efecto de la compactación sobre el crecimiento radical en maíz y soja obteniendo mayor acumulación de materia seca en raíces a una densidad de suelo baja ($1,30 \text{ mg m}^{-3}$) y menor acumulación de materia seca a altas densidades ($1,70 \text{ mg.m}^{-3}$) (Giardinieri *et al.* 2004).

Longitud del sistema radical

El sistema radical de *C. juncea* mostró una longitud promedio de 513cm y no mostró diferencias significativas entre tratamientos debido a la presencia de discos PV ($p= 51\%$). Los resultados indicaron que esta especie no fue afectada por las diferentes resistencias mecánicas (Cuadro 3).

En plantas de girasol, no se encontraron diferencias significativas ($p= 51\%$) en la longitud de raíces entre tratamientos, siendo la longitud promedio de 202 cm. Los diferentes grados de dureza de los discos PV no afectaron el alargamiento de raíces (Cuadro 3). Estos resultados no coinciden con los encontrados al evaluar la densidad de raíces en diferentes sistemas de laboreo (Ingaramo *et al.* 2003) quienes concluyeron que incrementos en la densidad aparente ocasionó disminución en la longitud de raíces de girasol, debido al efecto que

tiene el incremento de la resistencia y la disminución de la porosidad del suelo sobre las raíces. Por otra parte, difieren de lo indicado por Materechera *et al.* (1993), quien observó que una mayor resistencia a la penetración produce una disminución en la longitud de raíces y decaimiento de la planta debido a la menor capacidad de absorción de nutrientes, coincidiendo sus resultados con los encontrados para uva por Sellés *et al.* (2003).

Volumen radical total

Los valores de volumen radical promedio de plantas de crotalaria, arrojaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos. Existieron diferencias entre los tratamientos T_0 (00:00 PV: 5 cm^3 y T_3 (70:30 PV): 2.7 cm^3 (Cuadro 3). En el caso del girasol, esta variable no fue afectada por los tratamientos con discos PV ($p= 35\%$). Los resultados encontrados en la literatura señalan que a una densidad aparente de $1,76 \text{ mg m}^{-3}$ ocurre una limitación del crecimiento de las raíces de girasol (Ingaramo *et al.* 2003) debido a que generarían una resistencia entre 4,59-6 MPa. Así mismo, para esta especie, se encontró un valor crítico a una densidad de 1,46 a $1,63 \text{ mg m}^{-3}$ (Jones *et al.* 1991), que genera una resistencia de 0,19-0,87 MPa en suelos de textura arenosa, lo cual no fue evidente en la presente investigación.

Diámetro promedio total

Ambas especies presentaron raíces con un diámetro entre 0,05-0,2 cm; según Rosolem *et al.* (2001), raíces de 0,07 cm se clasifican como raíces finas y están relacionadas con la absorción de nutrientes y agua (Jensen

Cuadro 3. Valores promedio de materia seca, longitud, volumen, diámetro y superficie de raíces de crotalaria (*C. juncea*) y girasol (*H. annuus*), en cada tratamiento y profundidad del cilindro.

Tratam.	Prof. (cm)	Materia seca raíz (g)		Longitud raíz (cm)		Volumen raíz (cm ³)		Diámetro raíz (cm)		Superficie raíz (cm ²)	
		Crotalaria	Girasol	Crotalaria	Girasol	Crotalaria	Girasol	Crotalaria	Girasol	Crotalaria	Girasol
T ₀ 00:00	0-10	0,430	0,07	933	209,98	5	2,60	0,08	0,12	241	88,24
		±0,28	±0,21	±90	±78,48	±0*	±0,22	±0*	±0,03*	±15,83*	±20,92
T ₁ 30:70	0-5	0,294	0,071	835,68	356,45	5,20	2,2	0,09	0,09	231,68	95,58
		±0,08	±0,02	±38,44	±36,87	±0,45*	±0,76	±0,01*	±0,03*	±37,70*	±0,03*
T ₂ 50:50	5-10	0,005	0	11,26	0	1,92	0	0,51	0*	17,68	0
		±0,01	±0,01	±2,4	±0,03	±0,03	±0,23*	±0,23*	±0,23*	±1,79	±0,23*
T ₃ 70:30	0-5	0,341	0,063	1228,46	264,33	5,10	1,8	0,09	0,11	228,08	67,30
		±0,09	±0,01	±145	±76,84	±0,22	±0,45	±0,03*	±0,02*	±54,83*	±8,60*
T ₄ 100:00	5-10	0,006	0,01	53,69	29,46	1,91	0,1	0,29	0,06	29,45	6,50
		±0	±0	±13,9	±7,22	±0,02	±0	±0,13*	±0,01*	±9,95	±1,11
T ₃ 70:30	0-5	0,159	0,057	387,88	169,32	4	2,4	0,11	0,13	149,19	76,75
		±0,05	±0,02	±145,56	±44,25	±1,37	±0,89	±0,03*	±0,01*	±68,46	±27,26
T ₄ 100:00	5-10	0,005	0,017	7,07	52,90	1,92	0,56	0,56	0,10	10,68	6,17
		±0	±0,01	±1,57	±8,40	±0,03	±0	±0,40*	±0,06*	±8,06	±1,04
T ₄ 100:00	0-5	0,233	0,066	649,26	396	4	1,9	0,08	0,09	207,08	85,06
		±0,10	±0,001	±171,67	±37,67	±1,37	±0,89	±0,01*	±0*	±69,41	±4,33
T ₄ 100:00	5-10	0,033	0,007	2,61	17,68	1,95	0,23	0,45	0,21	8,48	4,59
		±0,003	±0	±1,8	±7,22	±0	±0,21	±0,33*	±0,01*	±3,21	±0,70

Tratam., tratamientos; Prof., profundidad. ± Indica el valor de la desviación estándar. *Indica diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para cada especie.

1994). Otros autores caracterizan las raíces de 0,36 cm como de diámetro pequeño, de ocurrencia en suelos con alta densidad (Costa *et al.* 2005). La respuesta fisiológica de las raíces a cambios en la impedancia mecánica en el tiempo, son complejas y no pueden ser explicadas por un modelo simple de alargamiento celular. Sin embargo las diferencias entre cultivares o especies debidas a la presencia de capas compactadas, podrían ser más fáciles de explicar debido a que se relacionan con el diámetro de la raíces. De este modo, se ha encontrado que raíces de mayor diámetro tendrán una mayor capacidad de penetración (Clark *et al.* 2003; Singh *et al.* 2010).

En la presente investigación, el diámetro promedio de raíces de crotalaria difirió entre tratamientos ($p= 1\%$) de 0 hasta 0,45 MPa (Cuadro 3). El diámetro se incrementó de 0,08 cm hasta 0,65 cm en plantas de crotalaria de T_0 y T_3 , respectivamente. Estos resultados coinciden con lo planteado en estudios con leguminosas forrajeras (Rosolem *et al.* 2001), entre ellas crotalaria, en un suelo con densidades aparentes de 1,35-1,70 mg m^{-3} , en los que la resistencia mecánica fue medida con un penetrómetro, notándose que valores de 0,97 MPa causaron modificaciones en el diámetro radical. Igualmente, con los cambios observados en el diámetro de las raíces de tres variedades de trigo, a medida que se incrementó el grado de dureza de los discos PV (Kubo *et al.* 2004). A este respecto, se ha encontrado que la presencia de capas compactadas reduce el desarrollo de las raíces de las plantas en general e incrementa su diámetro (Diaz-Zorita 2004),

lo cual no ocurrió para crotalaria. A este respecto, los resultados difieren de otras investigaciones en la que se ha encontrado que un incremento en el diámetro de raíces, resulta en un aumento de la presión de crecimiento propiciando la penetración de la capa compactada (Materchera *et al.* 1993) y cuando el impedimento mecánico es la presencia de una capa compactada, aumenta el diámetro y disminuye la longitud radical (Bennie 1996) y coinciden con resultados que indican que las raíces laterales son más delgadas que la principal, por lo que pueden penetrar en los poros más pequeños como una estrategia para incrementar el volumen de suelo a explorar (Montagu *et al.* 2001).

En girasol se observaron diferencias significativas ($p= 1\%$) en el diámetro promedio de raíces entre los tratamientos (Cuadro 3). Cabe señalar que los diferentes grados de impedancia mecánica ejercida por los discos PV afectaron el diámetro promedio radical, que disminuyó de 0,12 cm en ausencia de discos PV (T_0) hasta 0,08 cm en T_2 (50:50 PV). Así mismo, se ha determinado disminución en el diámetro de raíces de girasol en un suelo con densidades aparentes de 1,35-1,70 mg m^{-3} fue de 0,33 MPa (Rosolem *et al.* 2001). En el caso de girasol, siguiendo la clasificación de Rosolem *et al.* (2001), presentó raíces finas en todos los tratamientos, las cuales han sido relacionadas con el sostén, la conducción de nutrientes y la mayor parte de la fijación de carbono en el suelo (Rosolem *et al.* 2001; Jensen 1994). En otras especies como maíz (*Zea mays* L.), las raíces con un diámetro inferior a 0,05 cm han sido clasificadas como raíces muy

finas (Delgado *et al.* 2008).

Superficie radical total

La superficie radical total promedio de plantas creciendo en ausencia de discos PV (T_0), difirió estadísticamente del resto de los tratamientos, siendo de 241 cm² en crotalaria y 88 cm² en girasol. La presencia de discos PV afectó la superficie radical en ambas especies (Cuadro 3). En crotalaria los valores registrados fueron para T_0 (00:00 PV) 241 cm², T_1 (30:70 PV) 248 cm² y T_3 (70:30 PV) 159 cm², respectivamente. Esto indica que por cada unidad de peso de raíz (mg) se generó más superficie en raíces, lo cual se verificó en el incremento en diámetro de raíces de esta especie para algunos tratamientos con disco PV. Así mismo, el incremento en la superficie radical total, puede explicarse por el crecimiento compensatorio (incremento en la formación de raíces laterales) que ocurre cuando las raíces encuentran a capas compactadas horizontales (Clark *et al.* 2003; Montagu *et al.* 2001).

Para el caso de girasol, existieron diferencias en la superficie radical total entre T_1 (30:70 PV): 98 cm² y T_3 (70:30 PV): 76 cm² (Cuadro 3); las raíces en T_0 (sin disco PV) se comportaron igual que las de plantas creciendo en T_2 (50:50 PV): 67 cm² y T_4 (100:00 PV): 85 cm², y el tratamiento T_1 (30:70 PV): 98 cm². En esta especie, las diferencias obtenidas en la superficie radical total podrían relacionarse con la disminución en el diámetro de las raíces. Las raíces de girasol, presentaron el menor valor de superficie radical en T_2 (50:50 PV): 67 cm², con una impedancia de 0,17-0,22 MPa y crotalaria en T_3 (70:30

PV): 159 cm², con una impedancia de 0,22-0,27 MPa. Estos resultados coinciden con los encontrados por Rosolem *et al.* (2001), quienes determinaron valores de resistencia para crotalaria, similares a los de la presente investigación. Por su parte, estos autores afirman que en condiciones de cultivo, una resistencia de 0,27 MPa causa una reducción de la superficie radical total en crotalaria, con la consecuente disminución en la absorción de nutrimentos y reducción en el desarrollo de las plantas. De manera comparativa, los resultados muestran que girasol soportaría menos impedancia mecánica.

Longitud radical específica promedio (LRE)

Esta variable contribuye con la interpretación de los patrones de distribución de raíces, en función de su peso seco y la disponibilidad de nutrimentos en el suelo. Al comparar ambas especies bajo estudio, no se encontraron diferencias significativas ($p=57\%$) entre los tratamientos con discos PV, ni al comparar estos tratamientos con el testigo (Cuadro 4). Podría afirmarse que las diferentes resistencias mecánicas que ejercieron las capas PV no afectaron la distribución de raíces en las plantas en las condiciones de la presente investigación, siendo de 2.578 cm mg⁻¹ en crotalaria y 3.699 cm mg⁻¹ en girasol en ausencia de disco PV (T_0) y de 4.242 y 4.988 cm mg⁻¹ en T_4 (100:00 PV) para crotalaria y girasol, respectivamente. Se puede afirmar que la presencia del disco PV no afectó la distribución de la longitud del sistema radical en ninguna de las especies estudiadas, entonces podría

afirmarse que por cada miligramo de peso seco de raíz la longitud no difirió.

Superficie radical específica promedio (SRE)

Siendo la superficie radical específica la relación entre la superficie y el peso seco de la raíz, los resultados indicaron que para las especies bajo estudio, la distribución de la superficie radical, por cada mg de raíz no difirió debido a los tratamientos (Cuadro 4).

Materia seca promedio de tallos y hojas

La materia seca del vástago de crotalaria fue de 1,62 g y de 0,8 g en girasol en T₀ y los diferentes grados de impedancia mecánica, no afectaron la acumulación de

materia seca en los órganos aéreos de las plantas estudiadas entre los tratamientos con disco PV ni al compararlos con el tratamiento testigo (Cuadro 5). Los resultados difieren de otras investigaciones en las que se ha encontrado una correlación entre la disminución del crecimiento del sistema radical debido a incrementos en la impedancia mecánica del suelo y el crecimiento del vástago en brócoli (*Brassica oleracea*) (Bingham 2001; Montagu *et al.* 2001).

Conclusión

Bajo las condiciones de la presente investigación, la evaluación de la morfología cuantitativa de sistema radical, como expresión de un conjunto de variables

Cuadro 4. Longitud radical específica y superficie radical específica del sistema radical completo en cada tratamiento, para una profundidad de 10cm en crotalaria (*C. juncea*) y girasol (*H. annuus*).

Tratamientos (Proporción PV)	Profundidad (cm)	LRE (cm mg ⁻¹)		SER (cm ² mg ⁻¹)	
		<i>C. juncea</i>	<i>H. annuus</i>	<i>C. juncea</i>	<i>H. annuus</i>
T ₀ 00:00	0-10	2578 ±935 a	3699 ±1116 a	673 ±422 a	1320 ±388 a
T ₁ 30:70	0-10	2901 ±790 a	5218 ±1218 a	839 ±614 a	1401 ±602 a
T ₂ 50:50	0-10	2609 ±1086 a	3258 ±1182 a	729 ±525 a	1090 ±390 a
T ₃ 70:30	0-10	2785 ±1112 a	3237 ±755 a	915 ±806 a	1219 ±412 a
T ₄ 100:00	0-10	4242 ±723 a	4988 ±1520 a	1025 ±749 a	1235 ±353 a

Longitud radical específica (LRE) y superficie radical específica (SRE). Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas al aplicar la prueba de varianza Wilks Shapiro (p = 70%) y la prueba de medias Dunnett; ± indica el valor de la desviación estándar.

Cuadro 5. Materia seca del vástago de plantas de *Crotalaria* (*C. juncea*) y girasol (*H. annuus*) en cada tratamiento.

Tratamientos		Profundidad (cm)	Materia seca del vástago (g)	
Proporción PV			<i>C. juncea</i>	<i>H. annuus</i>
T ₀	00:00	0-10	1,42±0,48 a	0,74±0,08 a
T ₁	30:70	0-10	0,98±0,4 a	0,54±0,15 a
T ₂	50:50	0-10	1,2±0,2 a	0,5±0,12 a
T ₃	70:30	0-10	0,74±0,3 a	0,46±0,19 a
T ₄	100:00	0-10	1,3±0,3 a	0,6±0,16 a

Letras iguales significan ausencia de diferencias significativas al aplicar la prueba de Dunnett. ± indica el valor de la desviación estándar.

que lo caracterizan, permitió comparar la respuesta de raíces de crotalaria (*C. juncea*) y girasol (*H. annuus*) en presencia de discos PV. A este respecto, crotalaria presentó el mayor índice de penetración de raíces, lo cual le permitió el establecimiento de un sistema radical con mayor número de raíces en toda la profundidad del perfil estudiado. Esta especie, respondió positivamente a la restricción impuesta por la impedancia mecánica generando incrementos en el diámetro de las raíces y cambios en el volumen radical. En comparación con crotalaria, la morfología cuantitativa del sistema radical de girasol reflejó mayor susceptibilidad de las raíces a la impedancia mecánica. Esta especie mostró disminución de la superficie radical en menor número de raíces y raíces más superficiales en el perfil estudiado en respuesta a la mayor impedancia mecánica. Al comparar la respuesta del sistema radical de ambas especies, en términos de las variables estudiadas, se puede afirmar que crotalaria es una especie con mayores probabilidades de desarrollar sus raíces

bajo condiciones de impedancia mecánica y mantener su desarrollo, en comparación con girasol.

Una recomendación derivada de la presente investigación consiste en la evaluación de sistemas radicales de crotalaria y girasol que permanezcan por mayor tiempo bajo tratamientos con capas PV en condiciones controladas.

Referencias bibliográficas

- ACUÑA, T. L. & L. J. WADE. 2013. Use of genotype x environment interactions to understand rooting depth and the ability of wheat to penetrate hard soils. *Ann Bot.* 112(2):359-368.
- BENNIE, A.T. 1996. Growth and mechanical impedance. In: Waisel Y, Eshel E (Ed.). *Plant roots: The hidden half.* 2nd Ed. Marcel Dekker Inc. New York, USA. pp:453-470.
- BINGHAM, I. J. 2001 Soil-root-canopy interactions. *Ann. Appl. Biol.* 138, 243-251.
- BOWEN, H. D. 1981. Alleviating mechanical impedance. In: *Modifying*

- the Root Environment to Reduce Crop Stress (eds G.F. Arkin and H.M. Taylor). American Society of Agricultural Engineers, Michigan, USA. pp. 21–57.
- BRAVO, C., Z. LOZANO & B. MORENO. 2004. Efectos de diferentes especies de coberturas sobre las propiedades físicas del suelo y su influencia sobre el rendimiento del algodón. *Bioagro* 9:67-75.
- CASANOVA, E. 2005. Introducción a la ciencia del suelo. Segunda edición. Venezuela. 343p.
- CASTRO, L. 2007. Evaluación del impacto de sistema de labranza en el patrón de crecimiento del sistema radical del Maíz cultivado en un suelo del estado Aragua. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero Agrónomo. Maracay, Venezuela. Universidad Central de Venezuela. 60p.
- CLARK L. J., W. R. WHALLEY & P. B. BARRACLOUGH. 2003. How do roots penetrate strong soil? *Plant Soil*. 255:93-104.
- COSTA, R., M. LIOVALDO & J. ADAIR. 2005. Características de algunos adubos verdes de interesse para a conservação de solos. *Pesquisa Agropecuaria Brasil*. 30:175-185.
- DELGADO, R., L. CASTRO, E. CABRERA, M. MUJICA, S. CANICHE. L. NAVARRO & L. NOGUERA. 2008. Relación entre propiedades físicas del suelo y algunas características del sistema radical del maíz, cultivado en un suelo Fluventic Haplustroll de textura franco arenosa de Maracay. Venezuela. *Agron. Trop*. 58:245-255.
- DÍAZ-ZORITA, M. 2004. Efectos de la compactación subsuperficial de un Hapludol Típico sobre la producción del girasol (*Helianthus annuus* L.). *Ciencias del Suelo* 22: 40-43.
- FAO. 2009. Manual de Agricultura de Conservación. Guía de Trabajo. Funciones del abono verde. 53p.
- GERSTER G., G. CORDONE & S. BARCIGALUPPO. 2006. Trigo en la rotación. Crecimiento de raíces en suelos compactados. Informe de actualización técnica N° 1. INTA Estación Experimental Agropecuaria Marcos Juárez.
- GIARDINIERI, N., N. GUTIERREZ & C. VENIALGO. 2004. Influencia de la compactación sobre el crecimiento radical en maíz y soja. Universidad Nacional del Noroeste. Comunicaciones científicas y tecnológicas. Resumen A-073.
- INGARAMO, O., A. PAZ & M. HUGO. 2003. Evaluación de la densidad aparente en diferentes sistemas de labores de suelos en el noroeste de la península Ibérica. Resumen A-32
- JENSEN, J. 1994. Some studies of root habits of sugarcane in Cuba. Tropical Plant Research Foundation. New York. Scientific Contribution. N° 21(1931):37.
- JONES, C., R. BLAND & J. WILLIAMS. 1991. Simulation of root growth: Modeling plant and soil systems. Ediciones 31. In the series Agronomy. 6:91-120.
- KUBO, K., Y. JITSUYAMA, K. IWAMA, T. HASEGAWA & N. WATANABE. 2004. Genotypic difference in root penetration ability by durum wheat (*Triticum turgidum* L. var surum)

- evaluated with paraffin –Vaseline discs. *Plant Soil* 262:169-177
- MATERECHERA, S., M. ALSTON, J. KIRBY & R. DEXTER. 1993. Field evaluation of laboratory techniques for predicting the ability of roots to penetrate strong soil and of the influence of roots on water sorptivity. *Plant Soil*. pp:149-158.
- MONTAGU, K. D., J. P. CONROY & B. J. ATWELL. 2001. The position of localized soil compaction determines root and subsequent shoot growth responses. *J. Exp. Bot.* 562:2127-2133.
- NHAN, D. Q., S. THAW, N. MATSUO, T. D. XUAN, N. H. HONG & T. MOCHIZUKI. 2006. Evaluation of root penetration ability in rice using the wax-layers and the soil cake methods. *J. Fac. Agric. Kyushu Univ.* 51(2):251-256
- OHEP, C., F. MARCANO, S. PUDZZAR & C. COLMENARES. 2002. Efecto de la labranza conservacionista en los atributos físicos del suelo que influyen sobre el rendimiento del maíz. *Bioagro* 14:37-45.
- PEÑALOZA, G. & J. PELAEZ. 2008. Evaluación de la actividad biológica de extractos de *Crotalaria juncea* mediante el modelo *Drosophila melanogaster*. *Vitae Colombia* 15(2):279-284.
- ROSOLEM, C., J. FOLONI & C. TRITAN. 2001. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. *Soil and Tillage Research* 65(2002):109-115.
- SADRAS, V., A. HALL, V. TRADANI & F. VILLELA. 1989. Dynamics of rooting and root length leaf area relationships as affected by plant population in sunflower crop. *Field Crops Research Netherlands* 22(1):45-57.
- SELLÉS, G., R. FERREYRA. G. CONTRERAS, R. AHUMADA, J. VALENZUELA & R. BRAVO. 2003. Manejo de riego en uva de mesa cv. Thompson Seedless, cultivada en suelos de textura fina. *Agricultura Técnica*, 63:180-192.
- SINGH, V., E. J. VAN OOSTEROM, D.R. JORDAN, C. D. MESSINA, M. COOPER & G. L. HAMMER. 2010. Morphological and architectural development of root systems in sorghum and maize. *Plant Soil* 333(1-2): 287-299.
- TENNANT, D. 1975. A test of modified line intercept method of estimating root length. *J. Ecol.* 63: 995-1001.