

## Propiedades físicas del suelo y distribución de raíces de maíz bajo diferentes tipos de cobertura y fertilización en un sistema conservacionista cereal-ganado

Sandra Vera<sup>1</sup>, Zenaida Lozano<sup>1</sup>, Deyanira Lobo<sup>1\*</sup>, Carlos Bravo<sup>2</sup>,  
Rosa Hernández<sup>2</sup> y Mavelys Delgado<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Apartado Postal 4579. Maracay 2101. Aragua, Venezuela

<sup>2</sup>Centro de Agroecología Tropical, Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez. San Antonio, Miranda, Venezuela

### RESUMEN

Para evaluar el efecto del tipo de cobertura (gramínea o leguminosa) y de fertilización fosfórica sobre las propiedades físicas del suelo y la distribución de raíces de maíz en un sistema cereal-ganado, se realizaron evaluaciones en un Typic Plinthustults (estado Guárico, Venezuela). El diseño experimental fue un factorial 2 x 4 (cobertura x fertilización) arreglado en parcelas divididas en franjas con tres repeticiones. Se usaron dos coberturas: *Urochloa dictyoneura* (UD) y *Centrosema macrocarpum* (CM) y cuatro tipos de fertilización fosfórica: Control (sin fertilización), BRF+M (dosis baja, 25% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como roca fosfórica, RF + inoculación micorrízica), ARF (dosis alta, 100% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> RF), y ARF+FD (dosis alta, 50% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> RF + 50% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como fosfato diamónico). Las mediciones se realizaron en la época de floración del ciclo 2007-2008. Se evaluó en el suelo: distribución de tamaño de partícula, densidad aparente, conductividad hidráulica saturada y distribución de tamaño de poros. En las raíces de maíz: longitud, densidad, biomasa y porcentaje de raíces, a tres profundidades (0-5, 5-15 y 15-30 cm). Los resultados muestran las mejores condiciones estructurales en el suelo con la cobertura UD, sin efectos por el tipo de fertilización fosfórica. El desarrollo de las raíces del maíz se vio afectado por el tipo de cobertura y fertilización fosfórica, con la concentración de más del 50% de las raíces en los 20 cm superficiales. En la cobertura CM el mayor desarrollo de raíces se produjo en el tratamiento Control, mientras que en UD fue en BRF+M, lo que indica la importancia del cultivo precedente sobre el desarrollo de las raíces del maíz en este tipo de sistema.

**Palabras clave:** Suelo de sabana, roca fosfórica, *Centrosema macrocarpum*, *Urochloa dictyoneura*, cultivos de cobertura, micorrizas.

### Soil physical properties and maize root distribution under different types of fertilization in a cereal – livestock conservationist system

### ABSTRACT

The effect of cover type (grass or legume) and phosphorus fertilization on soil physical properties and maize root distribution in a cereal-livestock system, on a soil Typic Plinthustults (Guárico state, Venezuela) was evaluated. The experimental design was a split plot in strips with three replications. Two cover: *Urochloa dictyoneura* (UD), and *Centrosema macrocarpum* (CM), and four types of phosphorus fertilization: Control (no fertilizer), BRF + M (low dose, 25% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> as rock phosphate, RF + mycorrhizal inoculation), ARF (high

---

\*Autor de correspondencia: Deyanira Lobo

E-mail: lobo.deyanira@gmail.com

dose, 100% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> RF), and ARF+FD (high dose, 50% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> RF + 50% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> as diammonium phosphate) were used. Measurements were made at flowering time of maize in 2007-2008. Particle size distribution, bulk density, saturated hydraulic conductivity, pore size distribution in were determined soil. In maize roots: biomass, length, density, and occupied area, at three depths (0-5, 5-15, and 15-30 cm). Were measured the results show the best structural conditions on soil under UD cover crops, without effects on the type of phosphate fertilizer. The development of maize roots was affected by cover crops and the type of phosphorus fertilization, with the concentration of more than 50% of the roots in the top 20 cm. In CM cover crop further development occurred in the control treatment, while UD was in BRF+M, which indicates the importance of the preceding crop on root growth of maize in this type of system.

**Key words:** Savannah soil, phosphate rock, *Centrosema macrocarpum*, *Urochloa dictyoneura* cover crops, mycorrhizal.

## INTRODUCCIÓN

Los Llanos Centrales venezolanos se caracterizan por ser una región agropecuaria con suelos ácidos y de baja fertilidad natural, principalmente en fósforo, donde los productores han adoptado como sistemas de producción el monocultivo de maíz o sorgo, con una intensa mecanización y la utilización de los restos de cosecha para el mantenimiento de una ganadería de doble propósito para la producción de leche y carne (Bravo *et al.*, 2004). Este sistema ha producido en los últimos años un severo deterioro de las propiedades del suelo con la consecuente disminución de la productividad. Debido a esta problemática, se han planteado diferentes opciones de manejo conservacionista para reducir todas aquellas limitaciones impuestas por la labranza intensiva y el monocultivo. Estas opciones incluyen el uso de siembra directa y la asociación de cereales con coberturas vivas permanentes (barbechos mejorados) de gramíneas o leguminosas.

Es conocido que en algunos suelos, el uso de la siembra directa produce incrementos en la densidad aparente, con las consecuentes disminuciones en la infiltración de agua, el desarrollo de raíces y la absorción de nutrientes (Ball-Coelho *et al.*, 1998). En estos casos, Martínez *et al.* (2008) sugieren la incorporación de otros cultivos en rotación con el cultivo principal, para mejorar el desarrollo de las raíces e incrementar la biodisturbación del suelo. El potencial de crecimiento de las raíces de los cultivos está determinado por las características del cultivar; sin embargo, puede ser afectado por condiciones adversas en el suelo, especialmente las condiciones físicas que controlan la disponibilidad de agua y oxígeno y la resistencia mecánica (Imhoff *et al.*, 2010). Por otro lado, la mayor proporción de nutrientes es adquirida por las plantas a través del sistema radical, el cual puede ser alterado por condiciones de manejo como el tipo de labranza (Delgado *et al.*, 2008a). Una forma de evaluar las estrategias de manejo del suelo es medir su efecto sobre las variables del sistema radical relacionadas con la absorción de nutrimentos y agua,

tales como densidad radical, longitud radical, diámetro y área radical y profundidad de enraizamiento (Delgado *et al.*, 2008b).

Ball-Coelho *et al.* (1998) y Qin *et al.* (2004), en sus trabajos evaluando labranza convencional (LC) y siembra directa (SD), señalan que en SD se produce una estratificación en el suelo de los nutrientes poco móviles como el P, lo cual promueve una mayor densidad de raíces en los horizontes más superficiales. La morfología de la raíz es un factor importante no sólo para la absorción de nutrientes inmóviles en el suelo como P, sino también para la absorción de N, lo cual está muy relacionado con el desarrollo de la parte aérea de la planta en una gran variedad de genotipos (Peng *et al.*, 2010).

En Venezuela se han realizado investigaciones evaluando el impacto de diferentes prácticas agrícolas (Nacci *et al.*, 1992; Ohep *et al.*, 2002), formas de colocación del fertilizante (Mier y Terán y Quintana, 1990), características físicas del suelo (Lobo *et al.*, 1996; Nuñez y Cabrera de Bisbal, 2002; Pulido *et al.*, 2002) y la asociación de cultivos bajo siembra directa (Pulido, 2003), sobre algunas características del sistema radical del maíz, pero poco se ha evaluado el efecto de la utilización diferentes tipos de fertilización fosfórica en sistemas mixtos cereal-ganado.

En este estudio se evaluó el efecto del tipo de cultivo de cobertura (gramínea o leguminosa) y el tipo de fertilización fosfórica sobre las propiedades físicas del suelo y algunas variables del sistema radical del maíz (*Zea mays* L.), luego de tres ciclos bajo un sistema mejorado maíz-ganado bovino en las sabanas bien drenadas del estado Guárico, Venezuela.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del ensayo y características del suelo bajo estudio

El estudio se realizó en un ensayo instalado en el año 2002 en un suelo clasificado como Typic Plinthustults,

francosa gruesa, caolínica, isohipertérmica (SSS, 2006), localizado en la estación experimental La Iguana, municipio Santa María de Ipire, estado Guárico, Venezuela (8° 25' N y 65° 25' O, 100 msnm), cuyas características iniciales se presentan en el Cuadro 1. El suelo evaluado presenta una textura gruesa (aF) con más de 80% de arena total, con predominio de arena fina (cerca de 50%) sobre el resto de las fracciones de arena en las capas consideradas.

La densidad aparente del suelo en las dos primeras capas están por debajo del límite crítico señalado por Pla (1983) para esta clase textural de 1,60 Mg/m<sup>3</sup> con un aumento en la última capa, lo que indica que el suelo no presenta problemas de compactación natural a nivel superficial, pero sí a nivel subsuperficial. De igual forma, la proporción de los poros con radio equivalente mayor a 15 μm (poros de aireación) es mayor de 10% en las dos primeras capas, lo cual indica que no hay problemas de aireación, pero sí en la última capa.

La conductividad hidráulica saturada, que determina la permeabilidad del suelo, es alta y está por encima del límite crítico de 0,5 cm/h, establecido por Pla (1983), lo cual está asociado a la textura arenosa que favorece la penetración y movimiento de agua en el perfil del suelo, pero limita la capacidad de retención de agua disponible. La fertilidad natural del suelo es baja, lo que se evidencia en su pH fuertemente ácido,

bajo contenido de materia orgánica y baja capacidad de retención de nutrientes en todas las capas, lo que hace necesaria la aplicación de fertilizantes para la producción de cualquier cultivo.

El clima de la zona es marcadamente estacional, con una época de sequía y otra de lluvia (aproximadamente seis meses húmedos), un relieve suavemente ondulado, con pendientes de 2%, precipitación media anual de 1369 mm y una temperatura media mensual de 27,3°C (Riera y Guerrero, 1984). En la vegetación natural de la zona predomina la gramínea *Trachypogon* sp (Hernández *et al.*, 2005)

### Diseño experimental y tratamientos

Se evaluó el efecto de dos cultivos de cobertura y cuatro tipos de fertilización fosfórica sobre las propiedades físicas del suelo y el patrón de distribución de raíces del maíz en un sistema mixto maíz – ganado bovino. Se utilizó un diseño de parcelas divididas en bandas, donde la parcela principal estuvo representada por los cultivos de cobertura y dentro de cada cobertura cuatro tipos de fertilización fosfórica. Debido a la necesidad de utilizar unidades experimentales suficientemente grandes para evaluar el efecto del manejo sobre los componentes vegetal, animal y las propiedades del suelo (Carpenter, 1998), se utilizaron parcelas de 75 x 350 m por cada cultivo de cobertura y tres parcelas de 15 x 60 m por tipo de fertilización distribuidas al azar dentro

**Cuadro 1.** Características iniciales (mayo 2002) del suelo ubicado en la Estación Experimental La Iguana (Guárico, Venezuela); n = 96 muestras.

Parámetro	Profundidad (cm) †		
	0 - 5	5 - 15	15 - 30
Arcilla (%)	6,83 (3,46)	9,40 (8,42)	10,06 (2,81)
Limo (%)	10,64 (2,50)	8,64 (3,01)	6,79 (1,71)
Arena total (%)	82,47 (4,59)	82,52 (10,57)	80,96 (7,67)
Distribución de arenas (%)	arena muy fina	3,48 (0,77)	5,43 (3,71)
	arena fina	51,49 (6,92)	49,21 (10,94)
	arena media	23,40 (5,37)	22,55 (10,25)
	arena gruesa	3,63 (2,60)	3,88 (2,24)
	arena muy gruesa	0,57 (0,43)	0,91 (0,71)
Clase textural	aF‡	aF	aF
Reacción del suelo (pH)	5,01 (0,18)	4,81 (0,25)	4,75 (0,24)
Materia orgánica (g/kg)	13,3 (3,0)	12,3 (2,6)	10,4 (2,7)
CIC (cmol <sub>e</sub> /kg)	3,06 (0,89)	2,30 (0,66)	1,81 (0,45)
Capacidad de campo (% p/p)	14,29 (1,58)	13,33 (0,89)	12,25 (1,18)
Punto de marchitez permanente (% p/p)	8,93 (1,37)	8,56 (1,66)	8,57 (1,10)
Agua aprovechable (% p/p)	5,36 (1,42)	4,77 (1,17)	3,68 (1,14)
Densidad aparente (Mg/m <sup>3</sup> )	1,51 (0,07)	1,59 (0,18)	1,72 (0,12)
Conductividad hidráulica (cm/h)	10,38 (6,34)	6,71 (1,42)	1,16 (0,82)
Porosidad total (% v/v)	44,77 (7,37)	39,33 (6,52)	33,20 (8,19)
Poros con radio >15 μm (% v/v)	15,70 (3,41)	11,53 (1,15)	5,98 (1,10)
Poros con radio <15 μm (% v/v)	29,64 (4,01)	29,06 (2,63)	27,22 (4,64)

† Desviación estándar entre paréntesis; ‡ aF: areno francosa.

de cada cobertura. Para la selección de las dimensiones, orientación de las parcelas, número de muestras y profundidades de muestreo, se realizó un estudio previo de variabilidad espacial de suelos (Hernández et al., 2005).

Los cultivos de cobertura utilizados fueron *Urochloa dictyoneura* (UD) y *Centrosema macrocarpum* (CM), los cuales fueron seleccionados por su abundante producción de biomasa y adaptabilidad a la zona (Bravo et al., 2004). Para el establecimiento de las coberturas se realizó una preparación convencional del terreno (dos pases cruzados de rastra), se aplicó roca fosfórica a razón de 300 kg/ha, incorporada con un pase de rastra. Se usaron 4 kg/ha de semillas de UD y 3 kg/ha de semillas de CM.

Las coberturas se sembraron en el año 2002 y a partir del año 2005 se sembró anualmente, usando las coberturas introducidas (UD y CM) como residuos para la siembra directa de maíz. Con una dosis básica de 150 kg/ha N, 150 kg/ha  $P_2O_5$  y 100 kg/ha  $K_2O$  para el maíz, los tipos de fertilización consistieron en la misma dosis de N y  $K_2O$  y se varió la fertilización fosfórica: sin fertilización fosfórica (Control); dosis baja de P como roca fosfórica (25%  $P_2O_5$  en función de la dosis básica de 150 kg/ha, es decir, 38 kg/ha de  $P_2O_5$ ) + inoculación con micorriza (BRF+M); dosis alta de P con 100 %  $P_2O_5$  como roca fosfórica, equivalente a 150 kg/ha (ARF) y dosis alta de fósforo con 50 %  $P_2O_5$  como RF + 50%  $P_2O_5$  como fosfato diamónico, equivalente a 75 kg/ha  $P_2O_5$  como roca fosfórica y 75 kg/ha de  $P_2O_5$  como fosfato diamónico (ARF+FD). Luego de la cosecha el pastoreo fue intensivo, con la introducción en cada parcela de un rebaño de ganado bovino equivalente a 2 UA/ha, consumiendo *ad libitum* toda la biomasa disponible proveniente de los residuos de cosecha del maíz y el rebrote de las coberturas (alrededor de cuatro meses).

En cada combinación de cobertura x fertilización fosfórica se tomaron 12 muestras de suelo no alteradas (en cilindros de 5 cm de diámetro y 5 cm de alto) y 12 disgregadas (compuestas), para los análisis de laboratorio, a tres profundidades (0 a 5, 5 a 15 y 15 a 30 cm). El muestreo se realizó en la época de floración del ciclo 2007 - 2008, aproximadamente 60 días después de la siembra (dds), para asegurar que las raíces del maíz hubiesen alcanzado su máximo desarrollo.

### VARIABLES EVALUADAS

Se evaluaron las propiedades físicas: distribución de tamaño de partícula, determinada por el método del hidrómetro (Gee y Or, 2002); capacidad de campo y punto de marchitez permanente determinados como el contenido de humedad que queda retenido en muestras

de suelo saturadas por capilaridad y luego equilibradas en olla de presión a potenciales mátricos de -33 y -1.500 kPa, respectivamente (96 h a cada presión); densidad aparente por el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986); distribución de tamaño de poros determinados en mesa de tensión a saturación (Pt: porosidad total) y a un potencial mátrico de -10 kPa (Pa: poros de radio  $> 15 \mu\text{m}$ ), la porosidad de retención (Pr) se calculó por la diferencia Pt-Pa (Blake y Hartge, 1986). La conductividad hidráulica saturada se determinó en un permeámetro de carga constante, siguiendo el método descrito en Pla (1983).

Para la evaluación del patrón de distribución de las raíces de maíz, se empleó el método del perfil de pared descrito por Böhm (1979), que consistió en la excavación de una calicata con 1 m ancho x 1 m largo x 1 m profundidad, en sentido transversal a las hileras del cultivo. Se realizó en tres puntos por cada tratamiento de fertilización fosfórica y para cada cultivo de cobertura (24 calicatas dentro de todo el ensayo). En cada parcela se realizó la evaluación de las raíces de forma cualitativa y cuantitativa. Para la evaluación cualitativa se descubrió en cada calicata el sistema radical mediante el uso de un cuchillo y una pequeña brocha, en sentido horizontal y vertical desde la base hasta la raíz más profunda. Posteriormente se procedió a dibujarlas, colocando un plástico delgado y transparente sobre el perfil de la pared expuesta.

Para la evaluación cuantitativa, se tomaron muestras en la pared de la calicata por el método del cilindro propuesto por Böhm (1979) y modificado por Nacci et al. (1992), con cilindros de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura, tres cilindros por capa en cada una de las calicatas (en el eje de la planta y a 15 cm a cada lado de la planta), a las mismas profundidades a las que se tomaron las muestras no alteradas.

Posteriormente, las raíces de maíz, contenidas en cada cilindro de suelo, se separaron mediante el método de lavado a mano descrito por Böhm (1979), con la aplicación a presión (teniendo cuidado de no deteriorar las raíces) en un tamiz de 250  $\mu\text{m}$ . Las raíces retenidas en el tamiz se separaron de impurezas utilizando una pinza metálica y se envasaron con etanol al 30% y se mantuvieron refrigeradas (-7 °C) hasta las determinaciones de laboratorio. En las raíces lavadas se determinó longitud (cm), densidad ( $\text{cm}^3$ ) y biomasa de raíces ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ) por estrato. Para el cálculo de la longitud de raíces se utilizó la fórmula de Newman simplificada por Tennant (1975), la biomasa se determinó por el peso luego de colocarlas en una estufa a 50°C por 48 h, y a partir del dibujo del sistema radical se cuantificó su distribución porcentual cada 10 cm.

## Análisis estadísticos

Los resultados obtenidos se analizaron con el programa estadístico SPSS 11.0 para Windows, usando la prueba de Tukey para la comparación de medias ( $\alpha = 0,05$ ) entre tipos de fertilización fosfórica dentro de cada cultivo de cobertura. Para evaluar el grado de asociación de las variables medidas en el suelo y las de desarrollo de raíces se usó la prueba de correlación de Pearson (Pardo y Ruiz, 2002).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Propiedades físicas del suelo

Los índices estructurales densidad aparente ( $D_a$ ), conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) y porosidad total  $CP \uparrow$  del suelo para los diferentes tipos de cobertura y fertilización fosfórica en cada una de las profundidades de muestreo se presentan en el Cuadro 2.

Los valores obtenidos en la  $D_a$ , en todos los casos están por debajo del límite crítico de  $1,60 \text{ Mg/m}^3$  para la clase textural areno francosa (Pla, 1983), e inferiores a los valores iniciales, principalmente en la capa superficial (Cuadro 2), lo cual puede atribuirse a la preparación del terreno para el establecimiento de los cultivos de cobertura y al efecto de las raíces de las coberturas (Bravo *et al.*, 2004). No se produjeron problemas de compactación producto de las labores mecanizadas para el cultivo o del pastoreo realizado en los ciclos maíz-ganado previos al muestreo. La  $D_a$  no se afectó por el tipo de cobertura, ni por la aplicación de los tratamientos de fertilización fosfórica en ninguno de los cultivos de cobertura evaluados, pero sí se apreció una tendencia a aumentar con la profundidad, con los menores valores en la capa superficial, aumentando en las capas más profundas. Este incremento de la  $D_a$  con la profundidad, se puede atribuir al mayor contenido de arcilla; y fue similar al señalado por otras investigaciones realizadas en el mismo suelo (Bravo *et al.*, 2004).

Los valores de la  $K_{sat}$  son muy altos en la capa superficial, disminuyendo con la profundidad (Cuadro 2), pero sin alcanzar valores limitantes para la penetración y movimiento de agua ( $< 0,5 \text{ cm.h}^{-1}$ ). Se presentaron diferencias estadísticas ( $P < 0,05$ ) por el tipo de fertilización fosfórica sólo en la cobertura UD, a partir de los 5 cm de profundidad. En general, los mayores valores se presentaron en la cobertura UD en la capa de 0 a 5 cm. Los valores más bajos se presentaron en UD en el tratamiento Control (sin fertilización fosfórica), lo cual puede atribuirse al escaso crecimiento de las raíces tanto de los cultivos de cobertura como del maíz. En campo se pudo apreciar en UD una menor cantidad de

bioporos (poros formados por acción biológica), los cuales contribuyen al movimiento del agua a través del perfil.

Los valores de  $K_{sat}$  estuvieron relacionados negativamente con la  $D_a$ , en ambas coberturas a las tres profundidades evaluadas ( $r(0-5 \text{ cm}) = -0,36^*$ ,  $r(5-15 \text{ cm}) = -0,34^*$ ,  $r(15-30 \text{ cm}) = -0,57^{**}$ ,  $P < 0,05$ ), lo que concuerda con lo encontrado por Lozano *et al.* (2010), en una evaluación realizada en la misma zona para la época posterior al pastoreo. Desde el punto de vista hidráulico, los resultados obtenidos en  $K_{sat}$ , luego de seis años de instalación del ensayo, son similares a los obtenidos en otras investigaciones y reflejan la facilidad para el flujo de agua y solutos en suelos de texturas gruesas (Ahuja *et al.*, 1989; Medina-Méndez *et al.*, 2006). La mayoría de los valores de  $K_{sat}$  disminuyeron ligeramente con relación a los valores iniciales, especialmente en el tratamiento Control. En este sentido, muchos estudios han reportado que el manejo del suelo con labranza cero o siembra directa disminuye la permeabilidad del suelo en comparación con otros tipos de manejo (Frede *et al.*, 1994; Reynolds *et al.*, 2000; Cameira *et al.*, 2003).

Los valores de  $P_t$  confirman las variaciones en la  $D_a$ , lo que indica la alta correlación de estas variables (Shaver *et al.*, 2002). Los análisis estadísticos revelaron diferencias estadísticas ( $P < 0,05$ ) entre tipos de fertilización fosfórica sólo para la cobertura UD (Cuadro 2). Los mayores valores se presentaron en la cobertura UD, en la capa superficial y en el tratamiento de fertilización fosfórica BRF+M a todas las profundidades en UD. En la cobertura CM, la  $P_t$  disminuyó con relación a los valores iniciales en las capas de 0 a 15 cm. Resultados similares fueron presentados por Bravo *et al.* (2004), quienes consiguieron diferencias entre cultivos de cobertura y por efecto del pastoreo, en la capa superficial del perfil.

Para diagnosticar las posibilidades de penetración y movimiento de agua en el perfil del suelo y las condiciones de aireación, no es suficiente considerar la  $P_t$ , sino que se debe evaluar la distribución de tamaño de poros en macro y microporos, los primeros son los poros de aireación y movimiento del agua y los segundos los de retención de agua (Pla, 1983; Bravo *et al.*, 2004; Martínez *et al.*, 2008). Los resultados de los poros de radio equivalente  $> 15 \text{ mm}$  o poros de aireación ( $P_a$ ) y los de radio equivalente  $< 15 \text{ mm}$  o poros de retención ( $P_r$ ) para los cultivos de cobertura, tipos de fertilización fosfórica y profundidades evaluadas, se presentan en las Figuras 1 y 2, respectivamente.

Los valores de  $P_a$  fueron en su mayoría valores superiores al 10 %, señalado por Pla (1983) como limitante para agricultura de secano, y por Martínez

**Cuadro 2.** Propiedades físicas del suelo en los tratamientos de fertilización fosfórica para el maíz en las coberturas y profundidades evaluadas.

Parámetro†	Profundidad (cm)	<i>Urochloa dictyoneura</i>						<i>Centrosema macrocarpum</i>					
		Control‡	BRF+M	ARF	ARF+FD	Control	BRF+M	ARF	ARF+FD	Control	BRF+M	ARF	ARF+FD
Da (Mg/m <sup>2</sup> )	0 - 5	1,49	1,45	1,46	1,47	1,41	1,47	1,47	1,43	1,41	1,47	1,47	1,43
	5 - 15	1,57	1,49	1,54	1,50	1,54	1,60	1,54	1,54	1,54	1,60	1,54	1,54
	15 - 30	1,60	1,52	1,53	1,48	1,55	1,60	1,50	1,52	1,55	1,60	1,50	1,52
Ksat (cm/h)	0 - 5	8,80	9,49	10,00	12,00	7,20	6,27	5,33	7,00	7,20	6,27	5,33	7,00
	5 - 15	1,96b	6,49a	5,55a	7,68a	5,56	5,78	3,31	2,96	5,56	5,78	3,31	2,96
	15 - 30	1,77b	5,82a	5,64a	7,39a	3,73	5,39	2,18	3,59	3,73	5,39	2,18	3,59
Pt (% v/v)	0 - 5	42,8c	50,2a	47,2ab	44,8b	40,2	38,5	41,4	40,0	40,2	38,5	41,4	40,0
	5 - 15	38,0b	45,5a	40,8b	41,1b	35,9	33,1	37,4	35,6	35,9	33,1	37,4	35,6
	15 - 30	37,9ab	44,0a	41,4ab	39,2b	37,1	35,9	35,9	37,2	37,1	35,9	35,9	37,2

† Da: Densidad aparente, Ksat: Conductividad hidráulica, Pt: Porosidad total.

‡ Control: sin fertilización fosfórica, BRF+M: dosis baja de P como roca fosfórica (25% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + inoculación con micorriza), ARF: dosis alta de fósforo (100 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como roca fosfórica), ARF+FD: dosis alta de fósforo (50 % roca fosfórica + 50% fosfato diamónico).

§ Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tipos de fertilización fosfórica para una misma cobertura y profundidad (Tukey, 95%).

*et al.* (2008), como un valor por debajo del cual se disminuye la respiración de las raíces; lo que indica que el sistema de manejo conservacionista empleado mantuvo las buenas condiciones de aireación del suelo, tal como ha sido señalado por Bravo *et al.* (2004). Los valores de Pa fueron superiores en CM para la primera capa (0 a 5 cm) y similares a los de la cobertura UD en las capas más profundas; se presentaron diferencias estadísticas significativas ( $P < 0,05$ ) por efecto del tratamiento de fertilización fosfórica, con los mayores valores en BRF+M y ARF para la cobertura UD y en BRF+M y Control para la cobertura CM, y los menores valores en ARF+FD en ambos cultivos de cobertura. La Pa fue mayor en la capa superficial (0 a 5 cm) y disminuyó en las capas subsiguientes.

En Pr los valores estuvieron entre 19 y 36%, mayores en la cobertura UD, principalmente a nivel superficial y disminuyeron a medida que se profundizó en el perfil. Los valores de Pr en UD fueron similares a los iniciales, mientras que en CM se produjo una disminución entre 6 y 35% (Figura 2). Se presentaron diferencias estadísticas ( $P < 0,05$ ) entre tipos de fertilización fosfórica en ambas coberturas. En UD los mayores valores de Pr se presentaron en el tipo de fertilización BRF+M; mientras que en CM el tratamiento con mayor Pr fue ARF, a las tres profundidades consideradas.

Del análisis de la distribución de tamaño de poros, se encontró que la mayor proporción de poros estuvo representada por la fracción de poros de retención, pero en la cobertura UD los valores estuvieron por encima del valor ideal de 25% (Martínez *et al.*, 2008), mientras que en la cobertura CM fueron menores a este valor, lo que indica su baja retención de agua.

### **Desarrollo de las raíces de maíz**

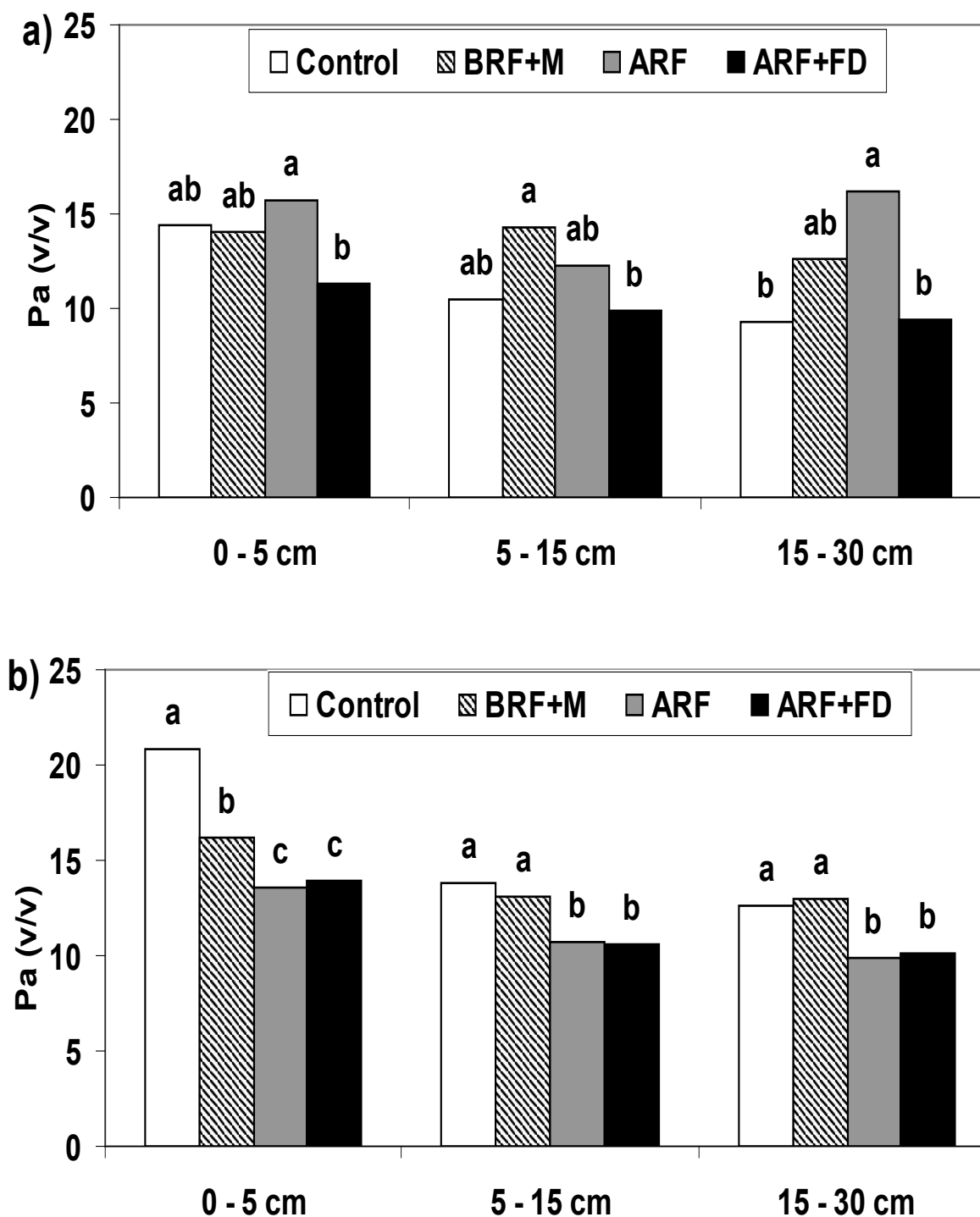
Los resultados de la longitud radical, la densidad radical y la biomasa seca, como variables utilizadas para evaluar el desarrollo de las raíces del maíz, en los tipos de cobertura y fertilización fosfórica a las profundidades evaluadas se presentan en el Cuadro 3.

Con relación a la longitud radical (LR) los valores fueron muy variables, desde 0,0 a 4850,9 cm. En la cobertura UD los mayores valores de LR se presentaron en las capas de 5 a 15 y 15 a 30 cm, mientras que en la cobertura CM los mayores valores se presentaron en las capas de 0 a 5 y 5 a 15 cm. Sin embargo, esta variable es muy dependiente del espesor del horizonte considerado. Con relación al tipo de fertilización fosfórica, se presentaron diferencias estadísticas significativas ( $P < 0,05$ ) en ambos tipos de cobertura. En UD los mayores valores se presentaron en BRF+M

y los menores en el tratamiento Control en todas las capas, mientras que en la cobertura CM se presentaron variaciones en las diferentes capas consideradas: en la capa de 0 a 5 cm no hubo diferencias entre tipos de fertilización, en las capas de 5 a 15 los mayores valores se presentaron en BRF+M y en la capa de 15 a 30 cm en el tratamiento Control. Para ambas capas la menor LR se presentó en el tratamiento ARF+FD. Estos resultados difieren de los de Fernández y Ramírez (2000), quienes no consiguieron efecto de la fuente de P sobre la longitud de raíces de 11 cultivares de maíz.

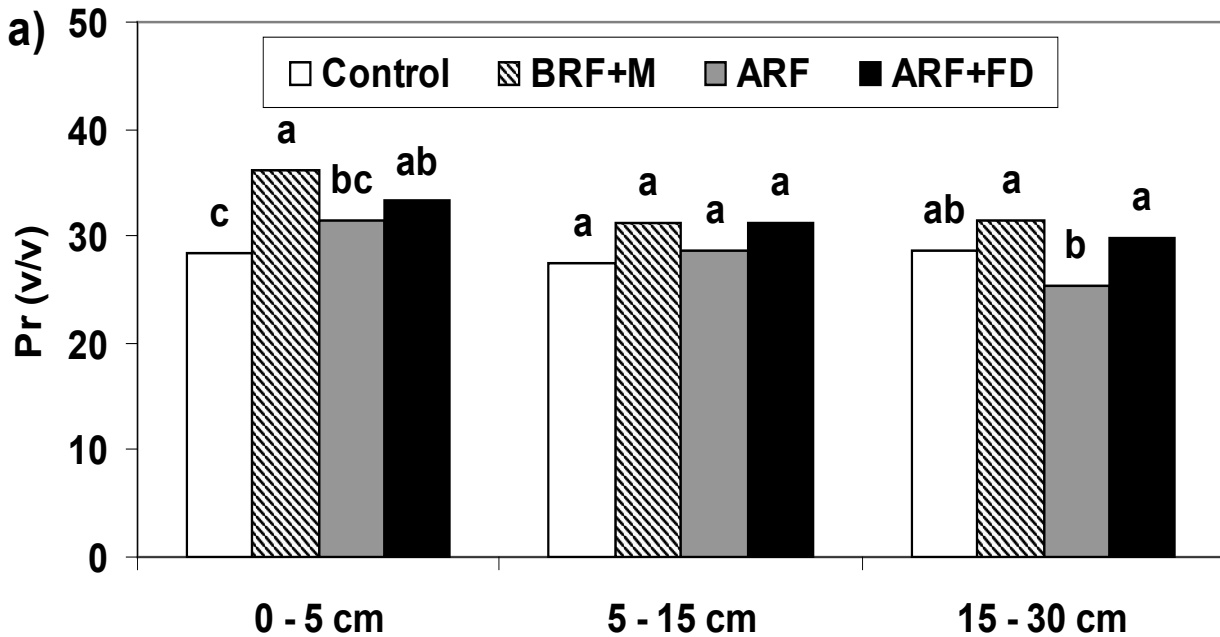
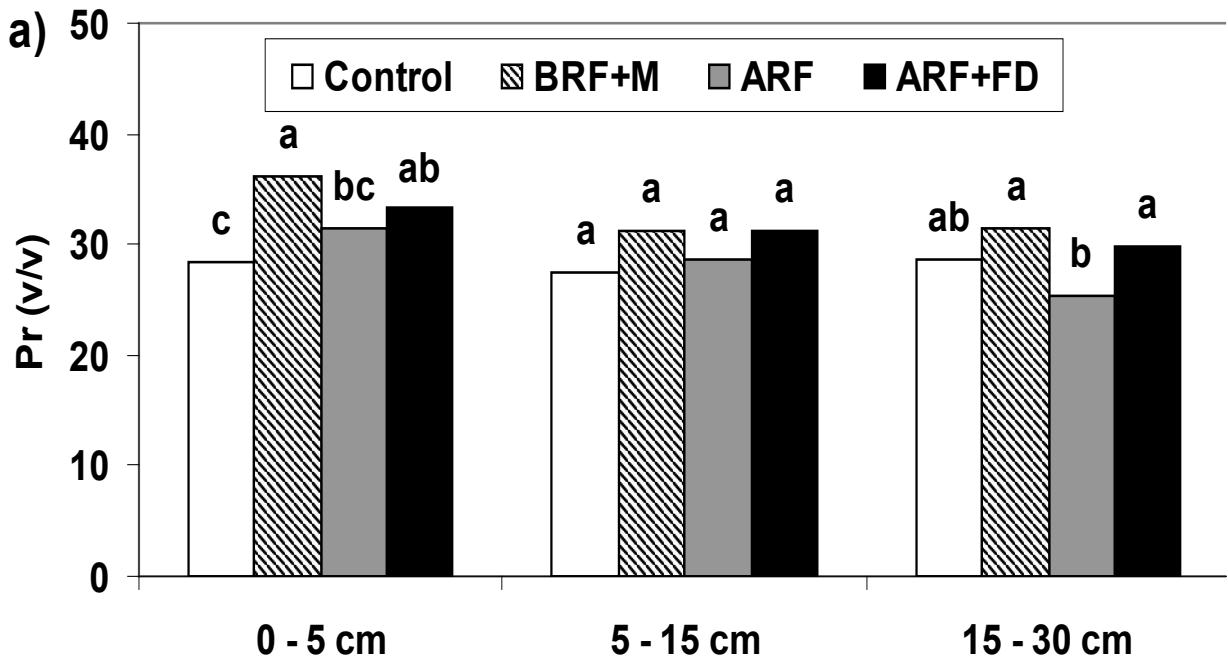
La densidad radical (DR) se ha relacionado con la actividad de las raíces en la toma de agua y nutrientes, y a su vez con la superficie específica de absorción. En términos generales, los mayores valores de DR se presentan en las capas superficiales y disminuyeron a medida que se profundizó en el perfil (Cuadro 2), lo que concuerda con lo señalado por varios autores (Ramírez, 1991; Pulido *et al.*, 2002; Martínez *et al.*, 2008). En la DR se presentaron diferencias estadísticas significativas entre tipos de fertilización fosfórica ( $P \leq 0,05$ ) en las tres capas cuando la cobertura fue UD y en las dos últimas capas cuando la cobertura fue CM. En UD los mayores valores de esta variable se presentaron en el tratamiento de fertilización fosfórica BRF+M y los menores en el tratamiento Control, en las tres profundidades consideradas. En CM los mayores valores se presentaron en los tratamientos BRF+M y Control y los menores en ARF+FD en las tres capas consideradas.

La biomasa seca de raíces (MS), en general fue mayor en la cobertura UD, con excepción del tratamiento Control, que fue mayor en CM a todas las profundidades evaluadas. Los valores de MS fueron mayores en la capa de 0 a 5 cm en ambas coberturas y todos tipos de fertilización fosfórica y disminuyó a medida que se profundizó en el perfil, lo que concuerda con lo obtenido por Pulido *et al.* (2002), quienes utilizando los mismos tipos de cultivos de cobertura, encontraron que las raíces de maíz en ambas coberturas fueron mayores en la capa superficial con tendencia a disminuir con la profundidad. En la cobertura UD los mayores valores estuvieron en el tratamiento de fertilización fosfórica BRF+M en las dos primeras capas y los menores valores se presentaron en el tratamiento Control en las tres capas evaluadas. Por el contrario, cuando el cultivo de cobertura fue CM, los mayores valores de MS fueron en el tratamiento Control y los menores en ARF+FD en las tres capas evaluadas. Estos resultados son contrarios a los señalados por Kay *et al.* (2006), quienes consiguieron que la reducción de la disponibilidad de P en el suelo restringiera la longitud de raíces, pero no su biomasa seca.



**Figura 1.** Poros de radio equivalente mayor a 15 mm ( $P_a$ ) del suelo en las coberturas: a) *Urochloa dictyoneura* y b) *Centrosema macrocarpum* y tipos de fertilización fosfórica para el maíz en las profundidades evaluadas. Control: sin fertilización fosfórica, BRF+M: dosis baja de P como roca fosfórica (25%  $P_2O_5$  + inoculación con micorriza), ARF: dosis alta de fósforo (100 %  $P_2O_5$  como roca fosfórica) y ARF+FD: dosis alta de fósforo (50 % Roca fosfórica + 50% Fosfato diamónico). ab Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 95%) entre tratamientos de fertilización fosfórica para una misma cobertura y profundidad.





**Figura 2.** Poros de radio equivalente menor a 15 mm (Pr) del suelo en las coberturas: a) *Urochloa dictyonera* y b) *Centrosema macrocarpum* y tipos de fertilización fosfórica para el maíz en las profundidades evaluadas. Control: sin fertilización fosfórica, BRF+M: dosis baja de P como roca fosfórica (25% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + inoculación con micorriza), ARF: dosis alta de fósforo (100 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como roca fosfórica) y ARF+FD: dosis alta de fósforo (50 % Roca fosfórica + 50% Fosfato diamónico). ab Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 95%) entre tratamientos de fertilización fosfórica para una misma cobertura y profundidad.

**Cuadro 3.** Parámetros de desarrollo de raíces en el cultivo de maíz bajo los tratamientos de cobertura y fertilización fosfórica evaluados.

Cobertura	Profundidad (cm)	Fertilización	Longitud de raíces (cm)	Densidad de raíces (cm/cm <sup>3</sup> )	Biomasa de raíces (g MS/cm <sup>3</sup> )
<i>Urochloa dictioneura</i>	0 a 5	Control†	907,2c ‡	0,14b	1,12a
		BRF+M	3 085,4a	0,49a	2,41a
		ARF	1 831,5b	0,29b	1,63a
		ARF+FD	1 535,9b	0,24b	1,29a
	5 a 15	Control	626,6c	0,05b	0,41b
		BRF+M	4 718,9a	0,38a	2,14a
		ARF	4 850,9a	0,39a	1,49ab
		ARF+FD	1 716,1b	0,14b	0,41b
	15 a 30	Control	0,0 c	0,0c	0,0b
		BRF+M	4 322,9a	0,23a	0,77a
		ARF	2 606,9b	0,14b	0,69a
		ARF+FD	2 936,9b	0,16b	0,82a
<i>Centrosema macrocarpum</i>	0 a 5	Control	2 991,9a	0,48a	3,49a
		BRF+M	1 737,9a	0,28ab	0,82ab
		ARF	2 018,5a	0,32ab	2,71a
		ARF+FD	1 528,9a	0,24b	0,45b
	5 a 15	Control	2 474,9ab	0,20ab	1,27a
		BRF+M	3 090,9a	0,25a	0,25b
		ARF	2 221,9ab	0,18ab	0,19b
		ARF+FD	1 165,9b	0,09b	0,14b
	15 a 30	Control	2 194,4a	0,12a	0,83a
		BRF+M	610,5bc	0,03ab	0,06b
		ARF	1 600,5ab	0,08ab	0,14b
		ARF+FD	137,5c	0,01b	0,01b

† Control: sin fertilización fosfórica, BRF+M: dosis baja de P como roca fosfórica (25% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + inoculación con micorriza), ARF: dosis alta de fósforo (100 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como roca fosfórica) y ARF+FD: dosis alta de fósforo (50 % Roca fosfórica + 50% Fosfato diamónico).

‡ Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, 95%) entre tratamientos de fertilización fosfórica para una misma cobertura y profundidad.

Al considerar los tres parámetros cuantitativos de desarrollo de raíces (LR, DR y MS) se puede señalar que la respuesta del maíz ante los diferentes tipos de fertilización fosfórica varió dependiendo del tipo de cultivo de cobertura. En forma general, cuando el cultivo de cobertura fue una gramínea (UD), el mayor desarrollo de raíces se presentó en BRF+M y el menor en el tratamiento Control, mientras que cuando el cultivo de cobertura fue una leguminosa (CM) el mayor desarrollo de raíces se presentó en el tratamiento Control y el menor en ARF+FD. Krannitz *et al.* (1991) mencionan que bajo condiciones de estrés de P las raíces

umentan su longitud y disminuyen su diámetro, pero que el volumen radical permanece constante, pero no debe haber limitaciones en la suplencia de otros elementos. En este trabajo, cuando no se fertilizó (Control) y el cultivo de cobertura fue la leguminosa (CM), el aporte de N por vía fijación permitió que el maíz creciera y sus raíces profundizaran en el perfil, al contrario en UD la planta tuvo muy poco crecimiento y las raíces se concentran en los primeros 15 cm.

Zhang *et al.* (2012) señalan que las plantas tienen diversas estrategias para hacer frente a la deficiencia de P, ya sea mediante la reducción de la

demanda de P a través de la tasa de crecimiento más lento, aumentando la eficiencia de uso interno de P, o aumentando la capacidad de adquisición de P por la alteración morfológica raíz, especialmente por la tasa de crecimiento significativamente mayor de raíces finas en las etapas de crecimiento clave. Por su parte, Liu *et al.* (2004) expresan que bajo condiciones de bajo nivel de P en el suelo, las raíces incrementan su crecimiento lateral, lo que pareciera ser un mecanismo específico de adaptación a la baja disponibilidad de P.

Al asociar las variables de suelo y las de las raíces, en forma general, se encontró que existe una relación negativa del índice estructural densidad aparente ( $D_a$ ) con DR ( $r = -0,252^{**}$ ) y con MS ( $r = -0,252^{**}$ ), es decir, que a medida que aumenta la densidad del suelo el desarrollo de las raíces se ve restringido. Por el contrario, se obtuvo una relación positiva de la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) con MS ( $r = 0,178^{**}$ ) y con DR ( $r = 0,181^{**}$ ), entre la porosidad total ( $P_t$ ) con MS, LR y DR (MS:  $r = 0,308^{**}$ ; LR:  $r = 0,195^{**}$ ; DR:  $r = 0,362^{**}$ ), entre la porosidad de aireación ( $P_a$ ) y MS ( $r = 0,307^{**}$ ) y entre  $P_a$  y LR ( $r = 0,365^{**}$ ), y entre la porosidad de retención ( $P_r$ ) y DR ( $r = 0,146^{**}$ ). Estos resultados son similares a los de Pulido *et al.* (2002), quienes reportaron que las propiedades físicas como  $D_a$ ,  $P_t$  y  $K_{sat}$  influyen sobre el desarrollo de las raíces del maíz, tanto en sentido vertical como horizontal. Con los tamaños de las partículas minerales hubo relación positiva entre los parámetros de desarrollo de raíces y las partículas entre 2 y 100  $\mu m$  (MS:  $r = 0,172^*$ ; LR:  $r = 0,170^*$ ; DR:  $r = 0,241^*$ ) y negativa entre el contenido de arcilla y MS ( $r = -0,139^*$ ). Estos resultados coinciden con lo señalado por Lobo *et al.* (1996), quienes reportaron que las características físicas del suelo influyen directa e indirectamente en el desarrollo y penetración de las raíces de los cultivos. De forma directa, los aumentos en los contenidos de arcilla y en la densidad aparente afectaron negativamente la penetración de las raíces por un efecto mecánico, e indirectamente a través de la limitación a la penetración y al movimiento del agua en el perfil en épocas críticas del desarrollo de los cultivos. Kay *et al.* (2006) también señalaron que a mayores contenidos de arcilla en el perfil del suelo se presenta un decrecimiento en el desarrollo de las raíces.

Al realizar la correlación por tipo de cobertura, se presentan las mismas relaciones significativas entre las variables de las raíces y  $D_a$ ,  $P_t$ ,  $P_a$  y las partículas de diámetro entre 2 y 100  $\mu m$  (datos no presentados). Al realizar el análisis por tipo de fertilización fosfórica se presentó correlación con las mismas variables físicas y las relacionadas con el desarrollo de raíces, pero la mayor cantidad de correlaciones significativas ( $P < 0,05$ ) se

presentaron en los tratamientos Control y BRF+M y el menor número de correlaciones en el tratamiento de ARF, lo que indica que cuando el nivel de fósforo en el suelo es bajo, la penetración de las raíces está más afectada por las características físicas del suelo y su posible efecto sobre las asociaciones simbióticas con las micorrizas, que ayudan a la absorción del P del suelo.

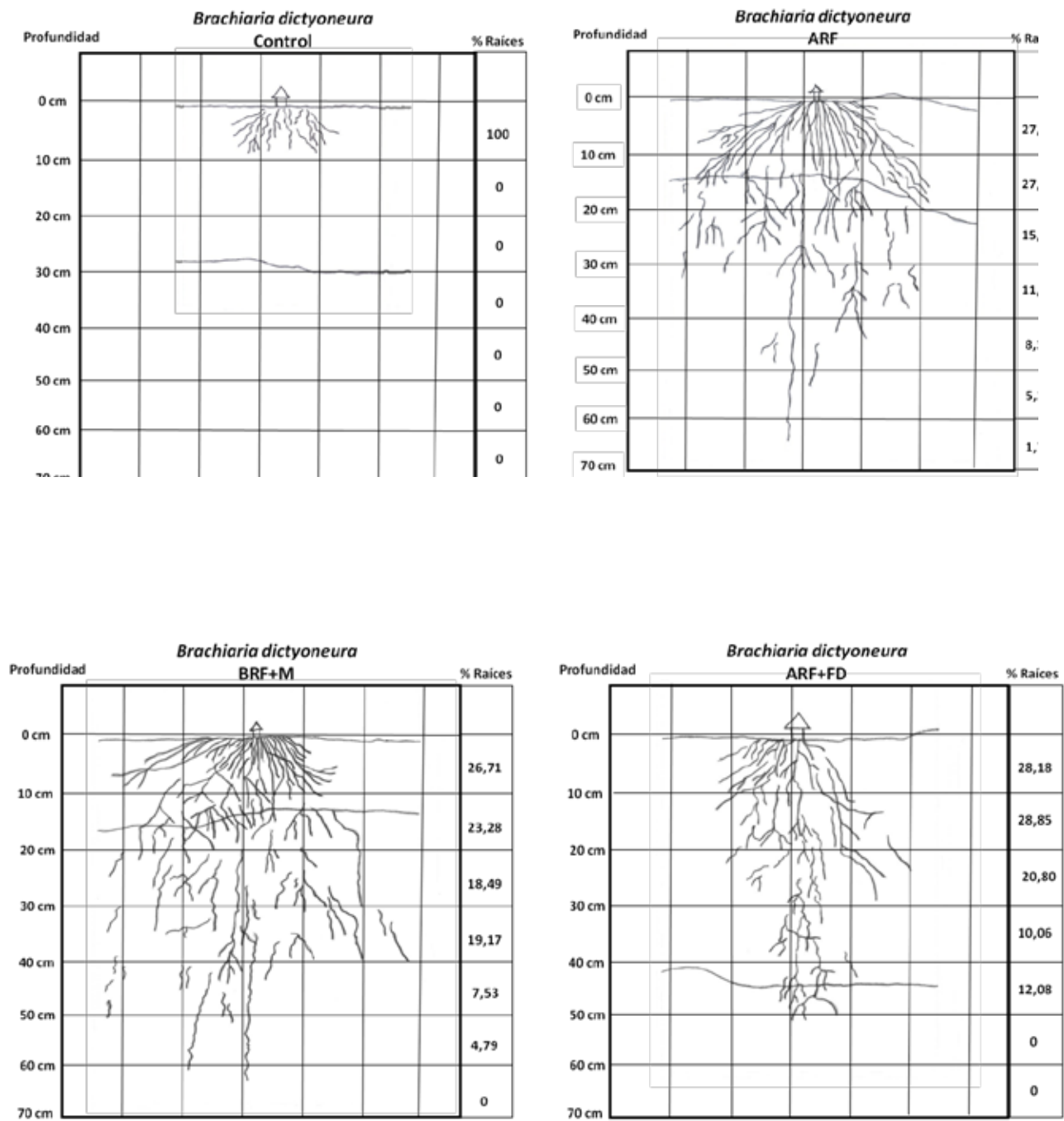
### Patrón de distribución de las raíces de maíz

En las Figuras 3 y 4 se presentan los diagramas del patrón de distribución de las raíces del maíz en los diferentes tipos de fertilización fosfórica para las coberturas UD y CM, respectivamente. Cualitativamente se pueden apreciar grandes diferencias en el patrón de distribución, tanto vertical como horizontal, de las raíces del maíz en cada combinación de cobertura y fertilización fosfórica.

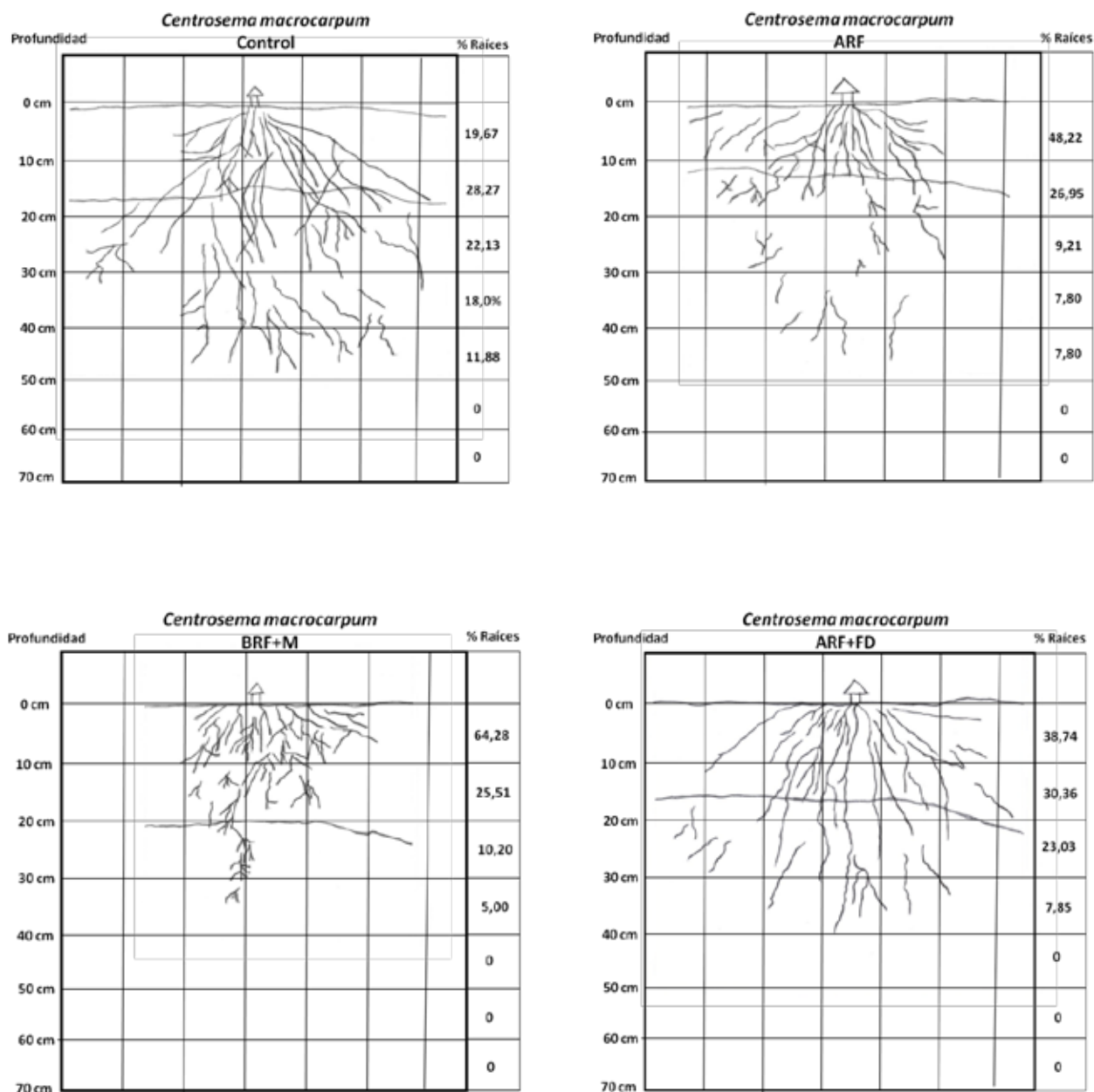
Se presentaron diferencias en la distribución de raíces cuando el cultivo de cobertura fue una gramínea (UD) o una leguminosa (CM). Bajo el cultivo de cobertura UD (Figura 3) se observó que en el tratamiento Control el 100% de las raíces se concentró en los primeros 10 cm, mientras que en los tratamientos fertilizados, las raíces alcanzaron a profundizar más allá de los 50 cm, observándose una mejor distribución en los tratamientos BRF+M y AFR. Esto concuerda con las medidas cuantitativas del desarrollo de raíces (LR, DR y MS). Cuando el cultivo de cobertura fue CM (Figura 4) más del 50% de las raíces en el tratamiento Control se concentraron en los primeros 30 cm, mientras que el resto de los tratamientos de fertilización fosfórica se concentraron en los primeros 20 cm, presentándose un desarrollo más superficial en el tratamiento BRF+M. La mejor distribución de raíces en la cobertura de gramíneas (UD) que en las leguminosas (CM) pudiera estar asociadas al tipo de sistema radical, fasciculado sin crecimiento secundario en UD y pivotante con ramificaciones laterales en CM, tal como lo señalan Roche *et al.* (1990) y Sierra (2005). En este sentido, Chen y Weil (2001) señalan que en este tipo de sistema de manejo mejorado con cultivos de coberturas se deberían combinar los cultivos de gramínea con leguminosa, ya que la gramínea proporciona un mantillo sobre el suelo que ayuda a la conservación del agua y la leguminosa funciona como una labranza biológica que favorece la penetración de las raíces del maíz.

### CONCLUSIONES

Después de seis años de la introducción de los cultivos de cobertura *Centrosema macrocarpum* (leguminosa) y *Urochloa dictyoneura* (gramínea), y los tratamientos de fertilización para el cultivo de maíz, se



**Figura 3.** Patrón de distribución porcentual de las raíces de maíz (*Zea mays* L.) sobre la cobertura *Urochloa dictyoneura*, en los diferentes tratamientos de fertilización fosfórica. Control: sin fertilización fosfórica; BRF+M: dosis baja de P como roca fosfórica (25%  $P_2O_5$  + inoculación con micorriza); ARF: dosis alta de fósforo (100 %  $P_2O_5$  como roca fosfórica) y ARF+FD: dosis alta de fósforo (50% roca fosfórica + 50% fosfato diamónico).



**Figura 4.** Patrón de distribución porcentual de las raíces de maíz (*Zea mays* L.) sobre la cobertura *Centrosema macrocarpum*, en los diferentes tratamientos de fertilización fosfórica. Control: sin fertilización fosfórica; BRF+M: dosis baja de P como roca fosfórica (25%  $P_2O_5$  + inoculación con micorriza); ARF: dosis alta de fósforo (100 %  $P_2O_5$  como roca fosfórica) y ARF+FD: dosis alta de fósforo (50 % Roca fosfórica + 50% Fosfato diamónico).

produjeron cambios en las propiedades físicas del suelo, en comparación con las condiciones iniciales, entre las que se destaca una disminución en la densidad aparente, conductividad hidráulica saturada y porosidad total, y aumentos en la porosidad de aireación, principalmente en las capas más profundas. Las mejores condiciones estructurales se presentaron en la cobertura *Urochloa dictyoneura*, sin efectos destacados por el tipo de fertilización fosfórica. El desarrollo de las raíces del maíz se vio afectado por los tipos de fertilización fosfórica, con la concentración de más del 50% de las raíces en los primeros 20 cm del perfil.

En la cobertura *Centrosema macrocarpum* el mayor desarrollo se produjo en el tratamiento sin fertilización fosfórica (Control), mientras que en *Urochloa dictyoneura* fue en el tratamiento con baja dosis de P e inoculación con micorriza (BRF+M), lo que indica un efecto importante del cultivo precedente sobre el desarrollo de las raíces del maíz en este tipo de sistema. Las características físicas del suelo influyeron sobre el desarrollo y penetración de las raíces del maíz en todas las coberturas y tipos de fertilización fosfórica, particularmente el aumento en los contenidos de arcilla y en la densidad aparente, afectaron negativamente la penetración de las raíces por un efecto mecánico.

### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Fondo Nacional para la Ciencia Tecnología e Innovación (FONACIT), a través del proyecto PG-2002-000398, y por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV), a través del proyecto PG 01-00-6542-2006. Se agradece el apoyo en la fase de campo al personal de la Estación Experimental La Iguana de la Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahuja, L.R.; D.K. Cassel; R.R. Bruce; B.B. Barnes. 1989. Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data. *Soil Sci.* 148: 404-441.
- Ball-Coelho, R.; R. Roy; C. Swanton. 1998. Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil. *Soil Till. Res.* 45:237-249.
- Blake J.; L. Hartge. 1986. Bulk density. In Klute C.A. (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Book Series 9. ASA-SSSA, Madison, EUA.* pp. 349-378.
- Böhm, W. 1979. *Methods of Studying Roots Systems.* Springer-Verlag, New York. EUA.
- Bravo, C.; Z. Lozano; R.M. Hernández; L. Piñango; B. Moreno. 2004. Efecto de diferentes especies de cobertura sobre las propiedades físicas de un suelo de sabana con siembra directa de maíz. *Bioagro* 16: 163-172.
- Cameira, M.; R. Fernando; L. Pereira. 2003. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal. *Soil Till. Res.* 70: 131-140.
- Carpenter, S.R. 1998. The need for large scale experiments to assess and predict the response of ecosystems to perturbation. In Pace, M.; P. Groffman (Eds). *Success, Limitations and Frontiers in Ecosystem Science.* Springer-Verlag, New York. EUA. pp: 287-312.
- Chen, G.; R.R. Weil. 2011. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. *Soil Till. Res.* 117: 17-27
- Delgado, R.; L. Castro; E. Cabrera de Bisbal; M. de Jesús Mujica; S. Caniche; L. Navarro; I. Noguera. 2008a. Relación entre propiedades físicas del suelo y algunas características del sistema radical del maíz, cultivado en un suelo Fluventic Haplustoll de textura franco-arenosa de Maracay, Venezuela. *Agron. Trop.* 58: 245-255.
- Delgado, R.; L. Castro; E. Cabrera de Bisbal; F. San Vicente; M. de Jesús Mujica; S. Caniche; L. Navarro; I. Noguera. 2008b. Evaluación de algunas características del sistema radical del maíz (híbrido INIA 68) cultivado bajo labranza mínima y convencional en un suelo de Maracay, Venezuela. *Agron. Trop.* 58: 427-438.
- Fernández, S.M.; R. Ramírez. 2000. Efecto de la fuente de fósforo sobre la morfología radical y la acumulación del elemento en siete líneas de maíz. *Bioagro* 12: 41-46.
- Frede, H.; R. Beisecker; S. Gath. 1994. Long-term impacts of tillage on the soil ecosystem. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 157: 197-203.
- Gee, G.W.; D. Or. 2002. Particle-size analysis. In Dane, J.H.; G.C. Topp (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 4. SSSA. Book Series No. 5.* Madison, EUA. pp. 255-293.
- Hernández, R. M.; Z. Lozano; C. Rivero, M. Toro; J. Salazar; A. Torres; A. Ojeda; J. Morales; J.C. Rey. 2005. Manejo agroecológico de suelos de sabanas bien drenadas con unidades de producción cereal – ganado. Primer Informe Técnico del proyecto FONACT 2002000398. Maracay. 192 p.

- Imhoff, S.; B.D. Kay; A. Pires da Silva; M.A. Hajabbasi. 2010. Evaluating responses of maize (*Zea mays* L.) to soil physical conditions using a boundary line approach. *Soil. Till. Res.* 106: 303-310.
- Kay, B.D.; M.A. Hajabbasi; J. Ying; M. Tollenaar. 2006. Optimum versus non-limiting water content for root growth, biomass accumulation, gas exchange and rate of development of maize (*Zea mays* L.). *Soil. Till. Res.* 88:42-54.
- Krannitz, P.G.; L.W. Aarssen; D.D. Lefebvre. 1991. Correction for non-linear relationships between root size and short term Pi uptake in genotype comparisons. *Plant Soil* 133: 157-167.
- Liu, Y.; G. Mi; F. Chen; J. Zhang; F. Zhang. 2004. Rhizosphere effects and root growth of maize (*Zea mays* L.) genotypes with contrasting P efficiency at low P availability. *Plant Sci.* 167: 217-223.
- Lobo, D.; Z. Lozano; I. Pla. 1996. Limitaciones físicas para la penetración de las raíces de maíz y sorgo en suelos de Venezuela. *Venesuelos* 4:19-24.
- Lozano, Z.; H. Romero; C. Bravo. 2010. Influencia de los cultivos de cobertura y el pastoreo sobre las propiedades físicas de un suelo de sabana. *Agrociencia* 44: 135-146.
- Martínez, E.; J. Fuentes; P. Silva; S. Valle; E. Acevedo. 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil Till. Res.* 99: 232-244.
- Medina-Méndez, J.; V.H. Volke-Haller; J. González-Eíos; A. Galvis-Spinola; M.L. Santiago-Cruz; J.L. Cortés. 2006. Cambio en las propiedades del suelo a través del tiempo en los sistemas de maíz bajo temporal y mango bajo riego en Luvisoles del estado Campeche. *Agrociencia* 22: 175-189.
- Mier y Terán, J.F.; T. Quintana. 1990. Producción de biomasa, nutrición y desarrollo radical del maíz (*Zea mays* L.) bajo tres condiciones de aplicación de fertilizante al suelo. Trabajo de Grado. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay. Venezuela. 92 p.
- Nacci, S.; E. Cabrera de Bisbal; J. Salazar. 1992. Efecto del método de labranza sobre las propiedades físicas de los suelos arenosos de las mesas orientales. *Boletín de Suelos de la FAO* 66: 164-174..
- Nuñez, M.C.; E. Cabrera de Bisbal. 2002. Efecto de la compactación del suelo sobre el transporte de oxígeno dentro del sistema radical del maíz. *Agron. Trop.* 52: 197-207.
- Ohep, C.; F. Marcano; S. Pudzzar; C. Colmenárez. 2002. Efectos de la labranza conservacionista en los atributos físicos del suelo que influyen sobre el rendimiento del maíz. *Bioagro* 14: 37-45.
- Pardo, A.; M. Ruiz. 2002. SPSS 11. Guía para el análisis de datos. McGraw Hill Interamericana de España. Madrid, España. 715 p.
- Peng, Y.; J. Niu; Z. Peng; F. Zhang; Ch. Li. 2010. Shoot growth potential drives N uptakes in maize plants and correlates with root growth in soil. *Field Crops Res.* 115: 85-93.
- Pla, I. 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Rev. Alcance Fac. Agron. UCV* 32. 91 p.
- Pulido, M.; D. Lobo; Z. Lozano; R.M. Hernández. 2002. Relación entre propiedades físicas de un suelo de los llanos centrales y el desarrollo de raíces de maíz (*Zea mays* L.) en sistemas mejorados maíz-ganado. *Venesuelos* 10: 61-66.
- Qin, R.; P. Stamp; W. Richner. 2004. Impact of tillage on root systems of winter wheat. *Agron. J.* 96: 1523-1529.
- Ramírez, G. 1991. Determinación del patrón de crecimiento radical de dos híbridos de maíz (*Zea mays* L.) en un suelo de Maracay. Trabajo de Grado. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 49 p.
- Reynolds, W.D.; B.T. Bowman; R.R. Brunke; C.F. Drury; C. Tan. 2000. Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 478-484.