

Estudio del sistema radicular como órgano que incrementa los rendimientos sin afectar al medio ambiente

Influencia del método de laboreo en el desarrollo radicular del trigo

A pesar de la gran importancia de las raíces de las plantas, la dinámica de su crecimiento es poco conocida debido al difícil acceso al sistema radicular. Nuestro conocimiento sobre las raíces, especialmente las raíces finas, su longitud y diámetro, diversidad estructural y funcional, longevidad y períodos de renovación, son muy deficientes. El estudio del sistema radicular de las plantas en condiciones de campo es aún más difícil y complicado debido a que el suelo limita su accesibilidad para la observación. En este artículo se presentan los métodos utilizados para el estudio de las raíces aportando un ejemplo del desarrollo radicular del trigo en suelos de secano de la campiña andaluza en función del sistema de laboreo.



**Verónica Muñoz-Romero,
Rafael J. López-Bellido, Luis López Bellido.**

Departamento de Ciencias y Recursos Agrícolas y Forestales.
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes.
Universidad de Córdoba.

El crecimiento radicular está determinado tanto por factores genéticos como por las propiedades físicas y químicas del suelo. Muchos son los factores que influyen en el crecimiento de la raíz, entre ellos: porosidad del suelo, la impedancia de la raíz, el contenido del agua del suelo, la temperatura, el oxígeno y el suministro de nutrientes.

La estructura del suelo es una propiedad esencial que define el entorno en el que van a desarrollarse las raíces de las plantas, siendo su mantenimiento esencial para un manejo sostenible de la fertilidad del suelo. El sistema de laboreo puede cambiar las propiedades del suelo, tales como la densidad aparente, la resistencia a la penetración y la estabilidad de agregados. También el laboreo influye en los procesos bióticos y abióticos, modificando propiedades estructurales como grietas, agregados y continuidad de los poros o afectando a la aireación, temperatura o humedad del suelo.

Numerosos estudios ponen de manifiesto que la mayor conservación del agua y las temperaturas más favorables en la superficie del suelo en el no laboreo o laboreo reducido, frente al laboreo convencional, favorecen el aumento del crecimiento radicular de forma más clara que el incremento del crecimiento de las plantas por encima del suelo.

Existen discrepancias sobre la influencia del déficit hídrico en la tasa de crecimiento ra-

dicular. Algunos estudios señalan que dicha tasa puede tanto disminuir como aumentar con el déficit hídrico; mientras que otros indican que el crecimiento radicular es muy poco sensible a los cambios de contenidos de humedad del suelo. La baja sensibilidad del crecimiento radicular a los déficit hídricos moderados es de fundamental importancia para la exploración continua y profusa del suelo por parte de las raíces, en especial bajo condiciones de secano, permitiendo que éstas se elonguen y absorban el agua a mayores profundidades.

Métodos utilizados para el estudio de las raíces

El difícil acceso al sistema radicular de las plantas para el estudio de su biomasa, distribución y dinámica de crecimiento requiere técnicas especiales. Tradicionalmente se han utilizado métodos de extracción de las raíces en las diferentes fases de crecimiento del cultivo para caracterizarlo. Éstos están basados en la recogida de muestras de suelo inalterado con una sonda de un volumen conocido, separándose suelo y raíces mediante lavado, y digitalizándolas para poder medir, mediante un escáner y un software de análisis de raíces, su longitud y superficie por unidad de volumen.

La extracción manual de raíces a partir de muestras de suelo es sin duda el método más exacto, pero presenta algunos inconvenientes: es una técnica destructiva; no se consigue una distinción efectiva entre raíces muertas y vivas; puede producirse una importante pérdida de raíces finas según la apertura de criba que se utilice; la toma de muestras en un solo estado de crecimiento del cultivo, lo más habitual en el método de extracción, no permite estudiar la dinámica del sistema radicular; y finalmente es una técnica laboriosa y que requiere mucho tiempo, tanto en el campo como en el laboratorio.

Recientemente están siendo cada vez más utilizadas técnicas no destructivas para estudiar in situ el sistema radicular, como es el minirhizotron. Éste es una de las mejores herramientas disponibles para obtener datos de mayor calidad acerca del sistema radicular y para avanzar en el estudio del crecimiento, demografía y dinámica radicales. Sin embargo, el minirhizotron presenta limitaciones, sobre todo cuando las raíces superan los 2 mm

FIGURA 1

Diagrama del minirhizotron con escáner cilíndrico como sistema de adquisición de imágenes.

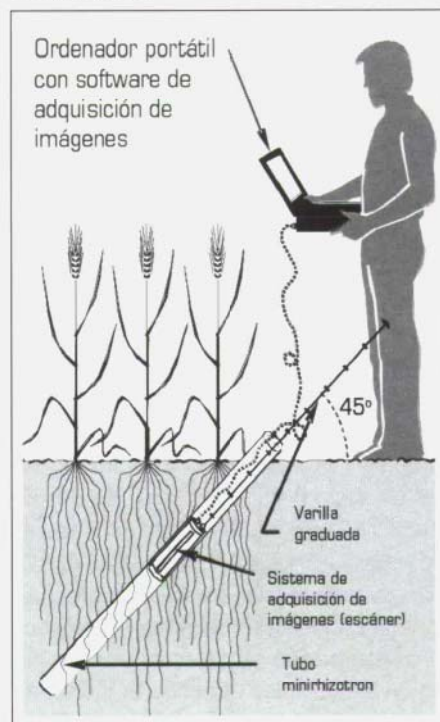
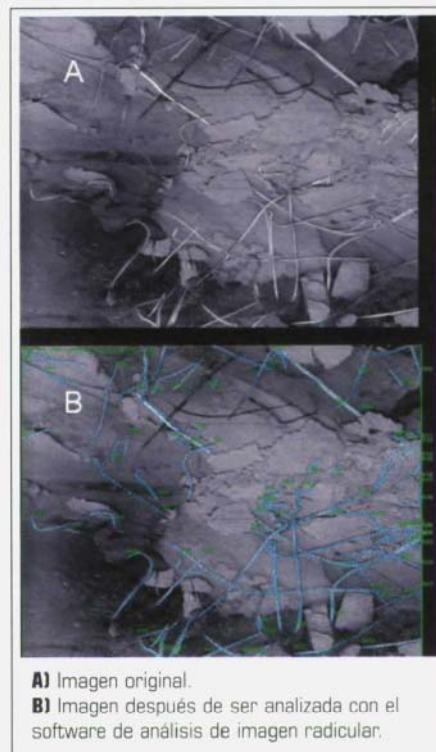


FIGURA 2

Imagen radicular obtenida a partir del minirhizotron.



A) Imagen original.
B) Imagen después de ser analizada con el software de análisis de imagen radicular.

de diámetro, por lo que el estudio de las raíces finas debe ser el principal objetivo del uso de este método.

El minirhizotron es un tubo transparente insertado en el suelo de manera permanente en el que se introduce un sistema de captación de imágenes (cámara fotográfica, sistema de video o escáner portátil y cilíndrico) conectado a un ordenador con un software de adquisición de las mismas, permitiendo observar las raíces que son interceptadas por la pared del tubo (figura 1). Posteriormente, en el laboratorio, las imágenes obtenidas se analizan en un ordenador provisto de un software específico para obtener los parámetros radicales.

Las medidas directas que se pueden obtener del procesado de imágenes del minirhizotron son: número de raíces, longitud, área, volumen y diámetro. A partir de ellas se calcula la densidad radicular y se hacen estudios sobre la producción y renovación de raíces finas a lo largo del tiempo, obteniendo así su período de vida. Además, el minirhizotron permite conocer la distribución radicular a lo largo del perfil de suelo. Estudios del sistema ra-

dicular con minirhizotron han permitido encontrar diferencias significativas entre años, sistemas de laboreo, estado fenológico del cultivo, profundidad de suelo, dosis de N fertilizante, y entre líneas de siembra y las distancias entre plantas. Con el minirhizotron también se puede calcular la biomasa radicular, estimada mediante una calibración previa en el mismo suelo y para la misma especie con un método manual de extracción con sondas de suelo.

La principal cuestión que se plantea al utilizar el minirhizotron es si las estimaciones son iguales a las que se realizan con la extracción de muestras de suelo. Los resultados obtenidos en diferentes estudios muestran cómo en algunos casos existe muy buena relación, en otros se produce subestimación y en otras ocasiones no existe relación alguna. El principal problema para obtener una buena relación está en la primera capa del suelo (0-10 cm), por lo que a veces se prescinde de ella para obtener una relación con el resto de profundidades. Esto es debido a que dicha capa es donde más se altera el suelo al introducir el tubo y donde peor contacto existe con el mismo, influyendo el tipo de suelo y su contenido

de agua. Sin embargo, aunque no exista una buena estimación real del sistema radicular en la capa superficial del suelo, como se ha comentado con anterioridad, esta técnica permite analizar las diferencias entre los distintos tratamientos que pueden afectar al sistema radicular.

La densidad radicular es uno de los parámetros más importantes y más ampliamente utilizados para describir el sistema radicular, especialmente el comportamiento de las raíces finas, y predecir su respuesta a cambios en el ambiente. La densidad radicular ha mostrado ser la medida más útil para cuantificar el crecimiento radicular. También el diámetro radicular es uno de los parámetros más importantes para modelizar la rizosfera. A nivel de planta, las raíces de gran diámetro representan la mayoría de la biomasa del sistema radicular. Las raíces de pequeño diámetro constituyen la mayoría del área superficial del sistema radicular y forman el lugar de intercambio entre planta y suelo, responsable de la toma de agua y nutrientes.

El desarrollo radicular del trigo

Durante tres años se realizó un experimento de campo en la campiña de Córdoba, en un suelo Vertisol representativo, para evaluar

la influencia del sistema de laboreo (laboreo convencional y no laboreo) en el desarrollo radicular del trigo, que fue cultivado en una rotación bianual continua con habas, en el marco del experimento de larga duración Malagón iniciado en 1986.

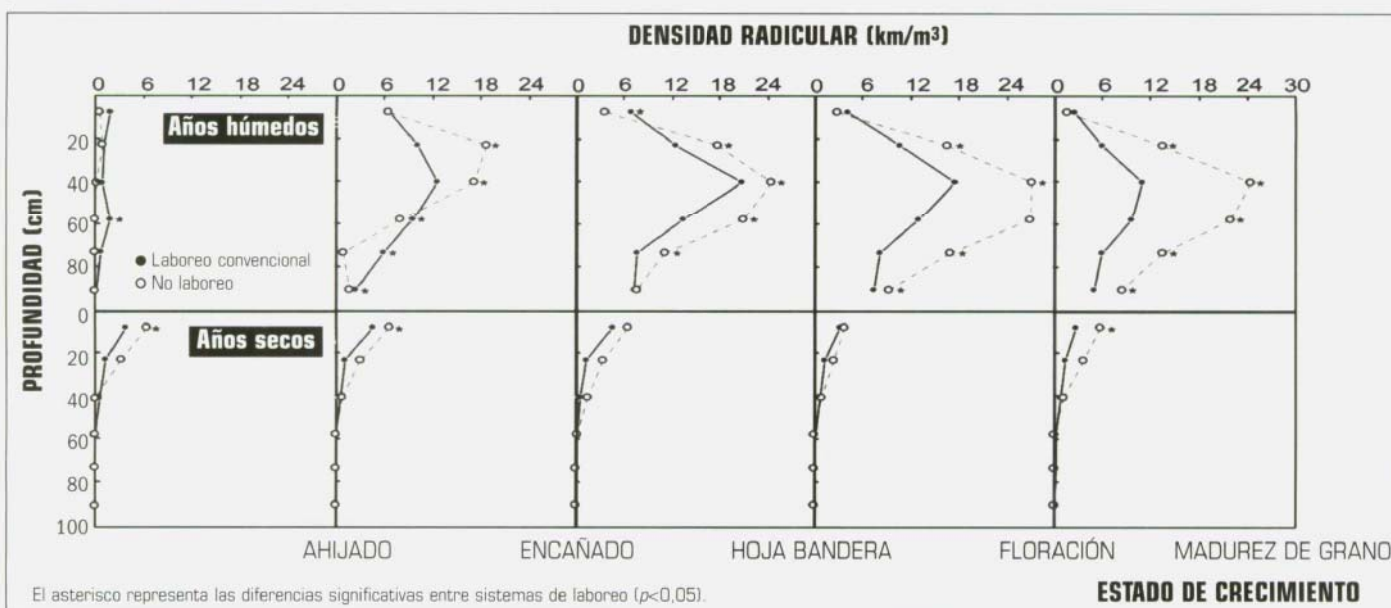
Para ello, en el centro de cada parcela y en la línea de siembra, tras la emergencia del trigo, fue enterrado un tubo de forma permanente, con una inclinación de 45° (figura 1), utilizando una sonda del mismo diámetro exterior del tubo con el fin de facilitar el estrecho contacto entre éste y el suelo. El escaner fue introducido sucesivamente en cada tubo hasta una profundidad de 100 cm, capturándose, con ayuda de una varilla graduada, las imágenes a 6 profundidades, equivalentes en la proyección vertical, según el ángulo de 45° de inserción del tubo en el suelo, a las profundidades de suelo 0-15, 15-30, 30-50, 50-65, 65-80 y 80-100 cm. La captura de imágenes fue realizada en los siguientes estados fenológicos del trigo: ahijado, encañado, hoja bandera, floración y madurez del grano. Los registros se realizaron entre los meses de febrero y mitad de mayo, en los tres años. El procesamiento de las imágenes fue realizado usando el software específico WinRhizotron, obteniéndose los valores de longitud radicular (cm) y el diámetro (mm) para cada parcela y estado feno-

lógico del trigo, según los distintos tratamientos (figura 2).

También en el centro de cada parcela y en la línea de cultivo de trigo, se muestrearon al azar tres cilindros de suelo usando una sonda específica de muestreo de raíces de 8 cm de diámetro. Cada cilindro de suelo fue tomado a los mismos estratos de profundidad que para el minirhizotron. El muestreo fue realizado en el período de floración del trigo, donde se supone que el desarrollo radicular es máximo. Las muestras de suelo obtenidas, antes de ser procesadas en laboratorio, fueron inmediatamente congeladas a -30°C para evitar la descomposición de las raíces. Para su lavado y separación se empleó la técnica de dispersión de las arcillas mediante el uso de calgón. Las muestras fueron mantenidas en dicha solución durante 12 horas, y a continuación fueron lavadas con agua separándolas con un tamiz de 0,2 mm de luz. Los residuos y las raíces muertas fueron separadas manualmente de las raíces vivas, en razón de su color y flexibilidad. Las raíces fueron escaneadas y sus imágenes procesadas para determinar la longitud, usando el software específico de tratamiento de imágenes CIAS versión 2.0. Posteriormente, fueron secadas a 40°C durante 24 horas y pesadas, determinándose su contenido de N mediante el método de combustión de Dumas.

FIGURA 3

Influencia del año y el sistema de laboreo en la densidad radicular del trigo según diferentes profundidades de suelo y estados de crecimiento.



CUADRO I.

Rendimiento de grano, biomasa y nitrógeno radicular del trigo según el año y el sistema de laboreo.

Año	Sistema laboreo	Rto grano	Biomasa radicular (kg/ha)	N radicular
2003-2004	NL	4.759a	6.345a	73a
	LC	4.085b	4.514b	52b
2005-2006	NL	2.930a	1.312a	17a
	LC	2.347b	769b	11b
2006-2007	NL	2.792b	1.287a	16a
	LC	3.330a	1.067a	12a

NL: no laboreo; LC: laboreo convencional.
Para cada año y parámetro, letras diferentes indican m.d.s ($p < 0,05$) entre sistemas de laboreo.

Además se calcularon los siguientes índices: densidad radicular, que expresa la longitud de raíces por volumen de suelo (km/m^3); biomasa radicular, que indica el peso de raíces por unidad de área (kg/ha); N radicular que representa la cantidad de N de las raíces por unidad de área (kg/ha).

La relación entre la longitud radicular obtenida con el minirhizotron y la densidad radicular estimada con la sonda de suelo para el mismo experimento y años fue altamente significativa. Dicha relación obtenida ha permitido la conversión de la longitud radicular a unidades de volumen (densidad radicular), que son más útiles para conocer el papel de la raíz en la investigación de campo sobre cultivos herbáceos.

De los tres años del estudio, uno fue más lluvioso (2003-2004), 704 mm, superando la media pluviométrica anual del área y los otros dos fueron secos, con una precipitación anual similar 402 mm (2005-2006) y 414 mm (2006-2007).

El rendimiento del trigo estuvo directamente relacionado con la cantidad anual de lluvia registrada y su distribución en la estación de crecimiento. El año 2003-2004 fue el que tuvo mayor rendimiento de grano (**cuadro I**). Los años más secos (2005-2006 y 2006-2007) registraron rendimientos de grano más bajos, aproximadamente cifrados en el 60 y 70%, respectivamente respecto al primer año (**cuadro I**). También el método de laboreo ejerció, en el conjunto de los 3 años de estudio, una influencia significativa en el rendimiento de grano, siendo mayor la producción en el no laboreo en los dos primeros años y a la inversa en el último año (**cuadro I**).

Densidad radicular

La densidad radicular difirió significativamente según los años, el método de laboreo, la profundidad de suelo y la fase de crecimiento del trigo (**figura 3**). La correlación entre la densidad radicular y la lluvia fue positiva y altamente significativa. En el año más húmedo la densidad radicular media fue $9,12 \text{ km}/\text{m}^3$ con un rango más amplio de variación en el perfil del suelo de 100 cm estudiado respecto a los otros dos años (**figura 3**). En los años 2005-06 y 2006-07, que fueron mucho más secos, los valores de densidad radicular no difirieron entre sí y fueron notablemente inferiores al año 2003-04, registrando un promedio de $1,32 \text{ km}/\text{m}^3$, es decir casi siete veces inferior (**figura 3**).

DEJA LAS MALAS HIERBAS EN MANOS DE IQV

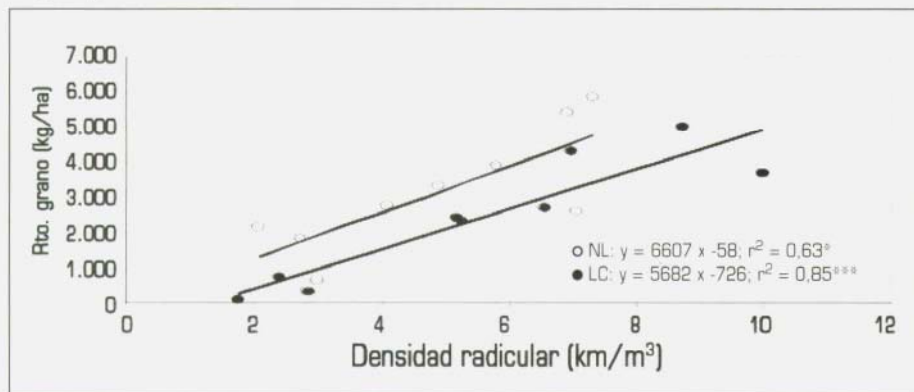
IQV Agro España
te ofrece un amplio catálogo
de herbicidas
para el cuidado de los cereales



iqv 75
ANIVERSARIO
1935 - 2010
www.iqvagro.com

FIGURA 4

Relación entre el rendimiento de grano y la densidad radicular en floración del trigo según el sistema de laboreo.



NL: no laboreo; LC: laboreo convencional.

En el conjunto del experimento, el no laboreo registró valores de densidad radicular significativamente mayores que el laboreo convencional (figura 3). Estas diferencias se registraron más claramente en el 2003-04, el año más lluvioso, de mayor crecimiento radicular y mayor rendimiento de trigo (figura 3 y cuadro I). Estas diferencias a favor del no laboreo fueron observadas a partir del estado de encañado del trigo y entre los intervalos de profundidad de suelo de 15-30 cm y 65-80 cm; en el horizonte más superficial (0-15 cm) y el más profundo (80-100 cm) no existieron tales diferencias (figura 3). En los años secos 2005-06 y 2006-07, tales diferencias de densidad radicular entre ambos sistemas de laboreo úni-

camente existieron en las capas más superficiales del suelo y especialmente en las primeras fases del crecimiento del trigo (figura 3). En conjunto, en el año húmedo la densidad radicular media fue 10,8 y 7,5 km/m³ en el no laboreo y laboreo convencional, siendo en los años secos 1,7 y 1 km/m³, respectivamente.

Globalmente la mayor densidad radicular se registró en los estratos 15-30 y 30-50 cm, siendo menor en la capa más superficial (0-15 cm) y con valores notablemente más bajos en las dos últimas capas estudiadas (65-80 cm y 80-100 cm) (figura 3). Este comportamiento fue observado únicamente el año de mayor crecimiento radicular (2003-04) (figura 3). Otros estudios realizados con minirhizotron

también han registrado valores de densidad radicular más bajos cerca de la superficie del suelo, atribuyéndolo al pobre contacto suelo-pared del tubo a profundidades superficiales y a una inhibición del crecimiento radicular causada por la entrada de luz cerca de la superficie del suelo. Las diferencias de crecimiento radicular encontradas en los Vertisoles de nuestro estudio, según el sistema de laboreo, y que son favorables al no laboreo, podrían ser atribuidas al efecto diferencial que tendría el método de laboreo en el contacto suelo-minirhizotron en la capa superficial del suelo, que sería más pobre en el laboreo convencional dada las especiales características físicas y la estructura de este tipo de suelos. También el "mulching" del no laboreo tendría un efecto positivo al reducir la entrada de luz en la superficie del suelo.

En el perfil del suelo completo y en el conjunto de los tres años de estudio, el promedio de densidad radicular se incrementó desde el ahijado hasta la fase de espigado-floración del trigo, donde se alcanzaron valores medios de 13,4 y 1,1 km/m³ para el año húmedo y los secos respectivamente, descendiendo en la fase de llenado del grano (figura 3). Este comportamiento fue claramente observado para las distintas capas de profundidad en el año 2003-04, siendo inapreciable en los otros dos años más secos, donde el desarrollo radicular del trigo fue, como se ha dicho, considerablemente menor (figura 3). Algunos estudios indican que el crecimiento radicular del trigo cesa o declina pasado el espigado. Según otros trabajos, la masa radicular del trigo se incrementa de manera exponencial o lineal hasta floración. No obstante este patrón varía según las condiciones de humedad del suelo y el estatus de N. Por otro lado, las raíces que crecen después de floración podrían competir con el grano por el carbono y el nitrógeno o pueden ser un medio importante en la retranslocación de N al grano.

Existió una estrecha relación directa entre los valores de la densidad radicular de todo el perfil de suelo y el rendimiento de trigo, en el conjunto de los años de estudio (figura 4). Dicha relación muestra como la respuesta del rendimiento al incremento de la densidad radicular es lineal y significativa, con niveles más altos para el rendimiento de grano bajo no laboreo frente al laboreo convencional, como también ha sido mostrado en el cuadro I.



En el perfil del suelo completo y en el conjunto de los tres años de estudio, el promedio de densidad radicular se incrementó desde el ahijado hasta la fase de espigado-floración del trigo.



Existió una estrecha relación directa entre los valores de la densidad radicular de todo el perfil de suelo y el rendimiento de trigo, en el conjunto de los años de estudio.

Biomasa y nitrógeno radicular

La biomasa radicular calculada por la relación densidad y biomasa radicular obtenidas según el método de sondas de suelo [$y = 923x + 63$ ($R^2 = 0,79^{***}$)], registró un valor medio para el conjunto del experimento y del perfil del suelo estudiado de 2.549 kg/ha. También el no laboreo registró mayor cantidad de biomasa radicular que el laboreo convencional en los dos primeros años, y no hubo diferencias significativas en el tercero (**cuadro I**).

El contenido medio de nitrógeno de las raíces del trigo fue 30 kg/ha, difiriendo significativamente según los años de estudio y los distintos estratos de profundidad estudiados. También el sistema de laboreo fue globalmente significativo, en los dos primeros años a favor del no laboreo (**cuadro I**). El N aportado por la raíz del trigo disminuyó al aumentar la profundidad del suelo; contribuyendo los primeros 30 cm del mismo con más del 60% del total de nitrógeno radicular del perfil estudiado (0-100 cm).

Conclusiones

La técnica del minirhizotron ha mostrado ser una herramienta útil para el estudio de la dinámica del crecimiento del sistema radicular del trigo bajo las condiciones de los Vertisoles de secano Mediterráneo. Sin embargo, dicha técnica requiere ser mejor calibrada, sobre todo para los 15 cm superficiales del suelo, donde existe un pobre contacto entre éste y el minirhizotron, debido a la especial estructura de los Vertisoles, sobre todo la presencia de grietas.

La cantidad de lluvia tiene una fuerte influencia en la densidad y la biomasa radicular del trigo hasta los 30-40 cm de profundidad de suelo, siendo los valores de ambos parámetros notablemente superiores en los años más lluviosos. En los primeros 30 cm de suelo se localizó el 25% de la densidad radicular total en el año húmedo y el 90% en los años secos.

El sistema de laboreo ejerció una influencia diferencial sobre la densidad y biomasa radicular según la capa de suelo estudiada, la fase de crecimiento del trigo y las condiciones de humedad del suelo; registrando el no laboreo mejor crecimiento radicular y mayor profundidad de penetración en el perfil del suelo, así como un mejor contacto suelo-minirhizotron en la capa superficial del mismo, frente al laboreo convencional.

Las raíces de los primeros 30 cm de suelo aportaron por encima del 60% de N total de las raíces del trigo.

La importancia del sistema radicular de las plantas ha sido puesta de manifiesto recientemente en un artículo de la revista Nature (An underground revolution, julio 2010) donde se señala que las raíces son la clave para una Segunda Revolución Verde. Por este motivo, los mejoradores de plantas están poniendo una especial atención en este órgano de las plantas para incrementar los rendimientos de los cultivos sin afectar al medio ambiente.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por los proyectos del Plan Nacional de I+D+I AGL2003-03581 y AGL2006-02127/AGR. Nuestro agradecimiento a la empresa ABECERA, propietaria de la Finca Malagón donde se ubica el experimento, por toda la colaboración prestada. También al Ministerio de Ciencia e Innovación-Fondo Social Europeo por la concesión de una beca para dicho trabajo. Además, un especial agradecimiento a Joaquín Muñoz, José Muñoz y Auxiliadora López-Bellido por su excelente ayuda en los trabajos de laboratorio y de campo.

Bibliografía ▼

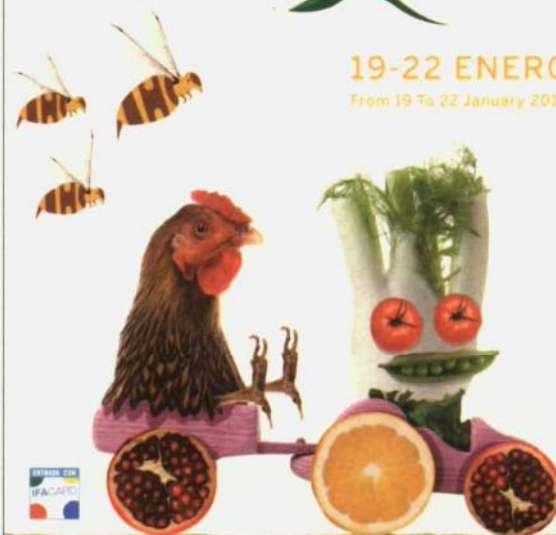
- Muñoz-Romero, V., López-Bellido, L., López-Bellido F.J., López-Bellido, R.J. 2009. Minirhizotron. Encyclopedia of Soil Science, 1: 1, 1-4.
- Muñoz-Romero, V., Benítez-Vega, J., López-Bellido, R.J., Fontán, J.M., López-Bellido, L., 2010. Effect of tillage system on the root growth of spring wheat. Plant Soil 326, 97-107.
- Muñoz-Romero, V., Benítez-Vega, J., López-Bellido, L., López-Bellido, R.J. 2010. Monitoring wheat root development in a rainfed vertisol: Tillage effect. European Journal of Agronomy 33, 182-187.

UN VIAJE AL CENTRO DE LA AGRICULTURA
A TRIP TO THE CORE OF AGRICULTURE

AGRITECO

19-22 ENERO 2011

From 19 To 22 January 2011



IFA

AGRITECO// 9ª FERIA DE LA TECNOLOGÍA AGRARIA DEL MEDITERRÁNEO, PRODUCTOS, SERVICIOS E INSTALACIONES PARA EL AGRICULTOR. 1º SALÓN DE PRODUCTOS, SERVICIOS E INSTALACIONES PARA LA APICULTURA.

9th FAIR OF THE MEDITERRANEAN AGRARIAN TECHNOLOGY, PRODUCTS, SERVICES AND FACILITIES FOR THE FARMER.

1st AUDITORIUM OF PRODUCTS, SERVICES AND FACILITIES FOR THE FARMER.



PABELLÓN I

Horario de 10:00 a 20:00 h.

Nº340, Km 731. 03320 Elche (Alicante)·Tel. 96 665 76 00 · Fax. 96 665 76 30
www.feria-alicante.com