

4

Importancia de las raíces sobre los procesos edáficos

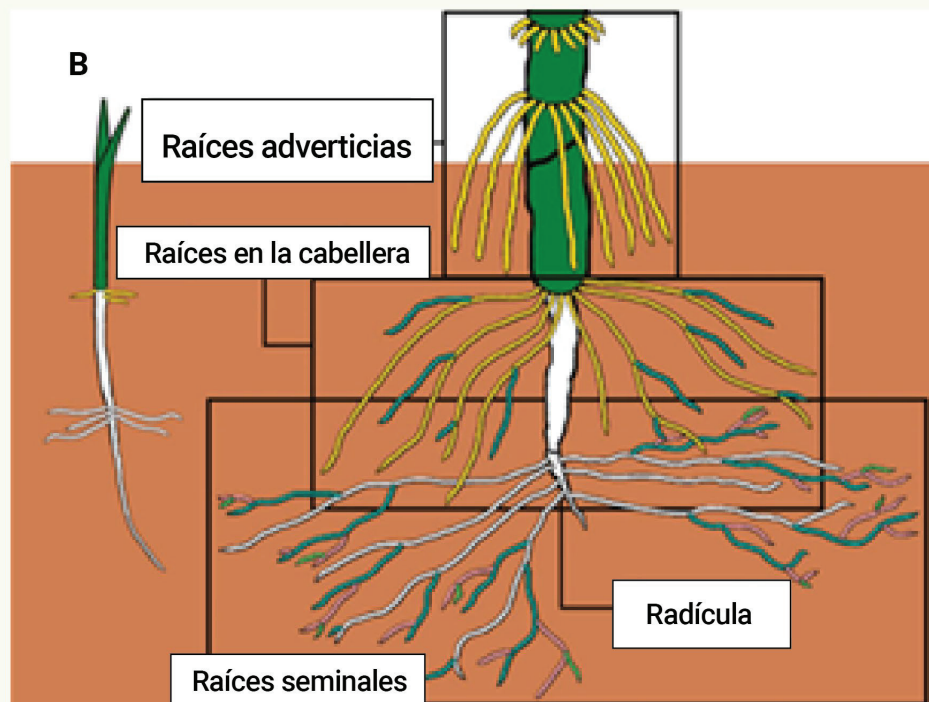
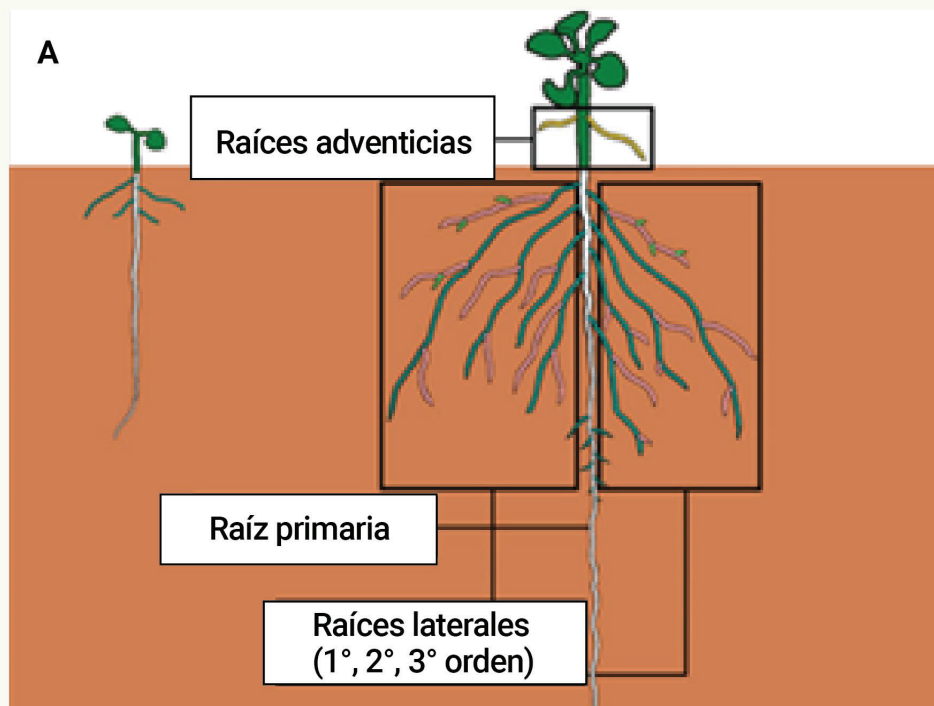
- **Ileana Frasier**
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Anguil y Conicet.
- **Cristian Álvarez, Romina Fernández y Alberto Quiroga**
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Anguil
- **Elke Noellemeyer**
Universidad Nacional de La Pampa.

Las plantas presentan diferentes sistemas radicales, los cuales consisten, básicamente, en una estructura subterránea con distintos órdenes de ramificación. En función del tipo de desarrollo se pueden identificar dos grandes categorías: los sistemas de raíces pivotantes, propios de las dicotiledóneas, conformados por una raíz primaria y otras laterales que emergen de ésta. La segunda categoría, representativa de las monocotiledóneas, corresponde a las raíces fasciculadas, donde la raíz primaria se encuentra poco desarrollada, mientras que las secundarias y adventicias crecen formando una cabellera.

La configuración espacial que adopta el sistema radical durante el crecimiento define su arquitectura y, por ende, su habilidad competitiva para captar los recursos. Tanto la profundidad que alcanzan las raíces como su abundancia y capacidad de enraizamiento lateral son características que contribuyen a describir el patrón de distribución radical. Su conocimiento permite establecer un diagnóstico acerca de la condición del suelo y lograr un manejo más eficiente de los recursos.

La relación raíz:parte aérea es otra característica de los sistemas radicales que refleja la partición de fotoasimilados entre estructuras aéreas y subterráneas. En zonas áridas y semiáridas, las plantas destinan una considerable proporción de su productividad anual a la formación y mantenimiento del sistema radical como estrategia para asegurar el suministro de agua (mayor exploración del suelo). En la región del Caldenal, valores de partición de entre 4 y 7 han sido registrados en especies permanentes nativas (*Stipatenuis* y *Piptochetium napostaense*) y exóticas (*Eragrostis curvula*). Sin embargo, esta relación también depende de la ontogenia de la planta (desarrollo). En especies forrajeras, los valores de partición aumentan con el año de establecimiento de la pastura; en cambio, en cultivos anuales la mayor proporción de fotoasimilados es destinada a las estructuras reproductivas, por lo cual, los valores de partición a raíz suelen ser similares o inferiores a 1.

Figura 1. Sistemas radicales pivotantes (A) y fasciculados (B)



- | | | |
|---|---|---|
| <input type="checkbox"/> Crecimiento primario | <input type="checkbox"/> 2do orden raíces laterales | <input type="checkbox"/> Raíces adventicias |
| <input type="checkbox"/> 1er orden raíces laterales | <input type="checkbox"/> 3er orden raíces laterales | |

Fuente: Adaptado de Atkinson et al. (2014).



Trabajando duro para facilitarte el trabajo duro

Conocé más



volkswagen.com.ar

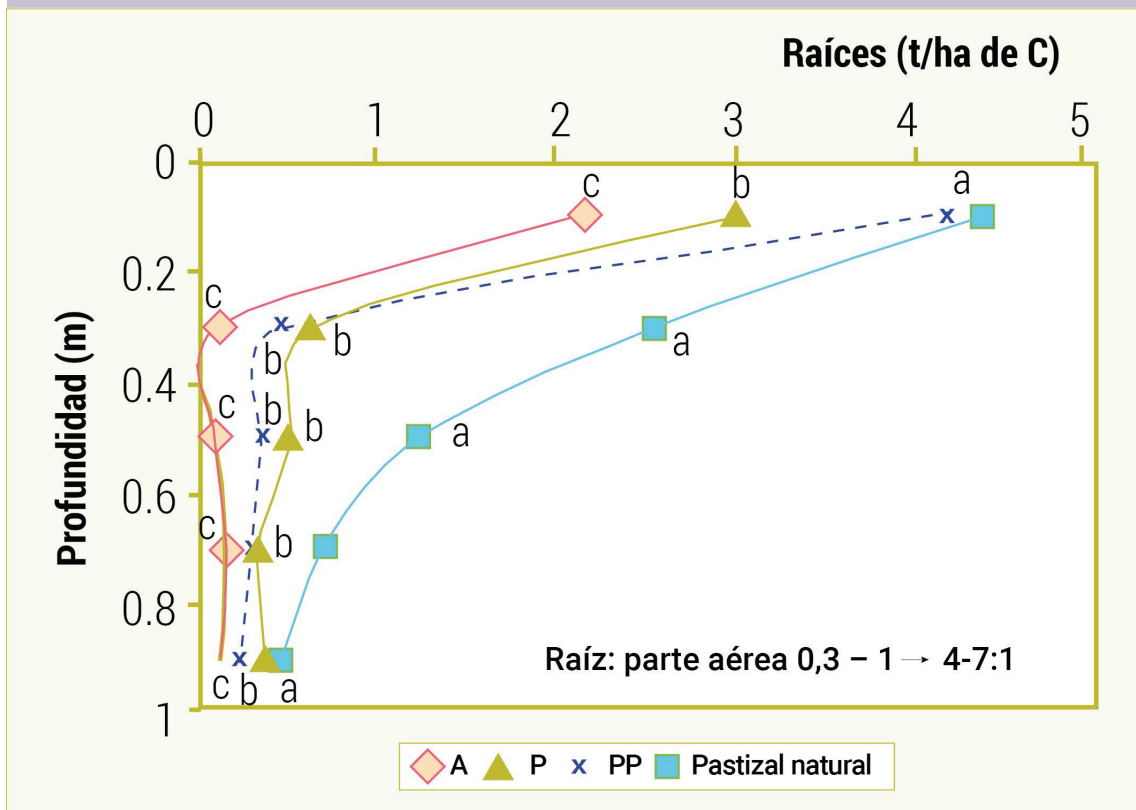
Foto no contractual. Equipamiento según versión. Origen: Argentina. Para más información consulte en www.volkswagen.com.ar. Volkswagen Argentina S.A. Av. De las Industrias No. 3101, Gral. Pacheco, Buenos Aires.

CREA

En el gráfico 1 se presentan los patrones de distribución de las raíces para diferentes prácticas de uso: pastizal natural del monte de caldén; pastura de festuca y agropiro de cuatro años de establecimiento (P); pastura permanente de *Eragrostis curvula* (pasto llorón) de 50 años (PP) y una secuencia de cinco años de efecto acumulado con vicia-centeno como cultivo de cobertura y maíz como cultivo de verano (A). Tal como se puede observar, la condición de referencia (pastizal natural) presentó la mayor biomasa de raíces en el perfil, contribuyendo con 5 toneladas de carbono por hectárea de raíces por debajo de los 20 centímetros de profundidad. Por el con-

Gráfico 1. Distribución del contenido de carbono de raíces según prácticas de uso en suelos de textura franca de la región semiárida pampeana

A) Secuencia de cinco años de efecto acumulado con vicia-centeno como cultivo de cobertura y maíz como cultivo de verano; P) Pastura de festuca y agropiro de cuatro años de establecimiento; PP) pastura permanente de *Eragrostis curvula* (pasto llorón) de 50 años.



Fuente: Adaptado de Frasier et al. (2019).

trario, el manejo agrícola modificó sustancialmente el aporte de carbono de raíces con una drástica disminución en todas las profundidades. Con respecto a la situación de referencia, dicha merma representó una reducción del 60% por debajo de los 20 cm de profundidad. Por su parte, las pasturas constituyeron una situación intermedia, aunque en ningún caso alcanzaron el aporte de raíces del pastizal natural.

Considerando que la concentración de carbono en los tejidos radicales es cercana al 40%, podemos mencionar valores de biomasa de raíces de 6 a 22 t de MS/ha hasta el metro de profundidad entre los manejos más contrastantes. Estos resultados evidencian la importancia del estudio de raíces en profundidad, ya que reflejan el impacto que tienen las prácticas de uso del suelo sobre el *stock* de carbono.

Otro aspecto interesante se relaciona con el patrón de distribución de las raíces. En general, se observa mayor abundancia en los primeros 20 cm de suelo, donde los recursos son más abundantes. Dicha respuesta puede adoptar un patrón más o menos estratificado en función de la especie. Por ejemplo, los cereales de invierno pueden presentar aproximadamente el 80% de sus raíces en los primeros 20 cm del perfil.

El suelo también puede imponer ciertas restricciones al desarrollo radical, las cuales están vinculadas a su condición genética o a limitantes de origen antrópico. Entre las principales limitantes se puede mencionar la textura, la estructura (agregación y porosidad), la resistencia a la penetración, la densidad aparente, el contenido de agua, la tasa de difusión de oxígeno, la temperatura, el pH y la presencia de sales. El sistema radical se adapta en respuesta a las limitaciones impuestas por el ambiente edáfico circundante generando modificaciones en su arquitectura, como así también, a través de cambios específicos del tejido que afectan a las necesidades metabólicas de la raíz y a la eficiencia de absorción de nutrientes.

La textura es uno de los factores que más condiciona la abundancia de raíces en el suelo. En el cuadro 1 (ver en la página siguiente) se presenta una recopilación de trabajos que cuantificaron raíces en condiciones de campo. En general, la bibliografía evidencia que en los suelos de texturas más gruesas la abundancia de raíces es mayor que en los de texturas finas. Cabe aclarar que existen diferentes metodologías de evaluación (monolitos, trincheras, barrenos tubulares o cilindros, rizotrones) y que cada una de ellas posee ventajas y desventajas a la hora de interpretar los resultados. Sin embargo, la más adoptada es la del cilindro o barreno tubular, probablemente por su menor costo económico y mayor simplicidad para la toma de muestras a campo, lo que permite trabajar con un mayor número de réplicas.



4R **RESPETO**
LO QUE LA TIERRA **PIDE**, LA TIERRA **DA**

fuerza
fuente dosis momento forma

Respetar los 4 requisitos para el manejo eficiente de los nutrientes es **cuidar** el medioambiente. Y el **futuro**.

PRO SUELOS eNeTOTAL PLUS +INFO PROFERTIL
Vida para nuestra tierra

www.profertilnutrientes.com.ar - 0800-666-7763 Profertil Nutrientes

Cuadro 1. Biomasa de raíces de diferentes cultivos cuantificadas en diferentes texturas de suelo, profundidades de estudio y metodologías implementadas (en kg de MS/ha).

Cultivo	Biomasa raíces (t de MS/ha)	Prof. (cm)	Textura	Metodología/herramienta utilizada	Referencia
Cereal de invierno	4,1-4,9	100	Arenosa	Barreno tubular	Oderiz et al., 2017
	2-2,5	30	Franco-arenosa	Cilindro	Chirinda et al., 2011
	2	95	Franco-arenosa	Cilindro	Cannells et al., 1985
	4,1-5	100	Franco-arenosa	Barreno tubular	Oderiz et al., 2017
	1,8	15	Franca	Cilindro	Austin et al., 2017
	0,9-1,5	60	Franca	Cilindro	Pietola y Alakukku, 2005
	1,3	35	Franco-arcillo-arenosa	Cilindro	Tahir et al., 2016
	1,2	75	Franco-arcillo-arenosa	Combina monolito y cilindro	Hirte et al., 2018
	3,7	50	Franco-limosa	Cilindro	Buyanovsky y Wagner, 1986
	3,6	15	Franco-arcillosa	Cilindro	Sievers y Cook, 2018
	L: 3; E: 0,6	20	Franco-arcillosa	Cilindro	Amato y Prado, 1994
	1,3	20	Franco-arcillosa	Monolito	Kuo et al., 1997 a ,b
	1,4	75	Arcillosa	Combina monolito y cilindro	Hirte et al., 2018
	0,8	100	Arcillosa	Barreno tubular hidráulico	Ojeda y Caviglia, 2018
	1,9-2,5	120	Arcillo-limosa	No especifica	Arslan y Kurdali, 1996
Maíz	2,7	30	Arenosa	Cilindro	Ball-Coelho et al., 1998
	9	70	Franco-arenosa	Cilindro	Dwyer et al., 1996
	1,3	15	Franca	Cilindro	Austin et al., 2017
	9,2	50	Franco-limosa	Cilindro	Buyanovsky y Wagner, 1986
	0,9	75	Franco-arcillo-arenosa	Combina monolito y cilindro	Hirte et al., 2018
	6,5	90	Franco-arcillosa	Cilindro	Dwyer et al., 1996
	L: 2,2; E: 1	60	Franco-arcillo-limosa	Cilindro	Ordóñez et al., 2018
	1,85	100	Franco-arcillo-limosa	Barreno tubular hidráulico	Dietzel et al., 2017
	4	10	Arcillosa	Cilindro	Mazzilli et al., 2015
	1,9	75	Arcillosa	Combina monolito y cilindro	Hirte et al., 2018
	1,2	100	Arcillosa	Barreno tubular hidráulico	Ojeda y Caviglia, 2018
	L: 2,6; E: 0,7	30	No especifica	Barreno tubular hidráulico	Nichols et al., 2019
Soja	3,4	50	Franco-limosa	Cilindro	Buyanovsky y Wagner, 1986
	3,9	112	Franco-limosa	Barreno tubular hidráulico	Benjamin y Nielsen, 2006
	L: 2,1; E: 0,6	60	Franco-arcillo-limosa	Cilindro	Ordóñez et al., 2018
	1,3	10	Arcillosa	Cilindro	Mazzilli et al., 2015
	1,2	100	Arcillosa	Barreno tubular hidráulico	Ojeda y Caviglia, 2018
	L: 1,4; E: 0,6	30	No especifica	Barreno tubular hidráulico	Nichols et al., 2019

Continúa en la página siguiente

Cuadro 1. Biomasa de raíces de diferentes cultivos cuantificadas en diferentes texturas de suelo, profundidades de estudio y metodologías implementadas (en kg de MS/ha).

Cultivo	Biomasa raíces (t de MS/ha)	Prof. (cm)	Textura	Metodología/herramienta utilizada	Referencia
Vicia	3,1	100	Arenosa	Barreno tubular	Oderiz et al., 2017
	3,9	100	Franco-arenosa	Barreno tubular	Oderiz et al., 2017
	1,2	20	Franco-limosa	Cilindro	Puget y Drinkwater, 2001
	1,8	35	Franco-arcillo-arenosa	Cilindro	Tahir et al., 2016
	1,2	15	Franco-arcillosa	Cilindro	Sievers y Cook, 2018
	0,5	20	Franco-arcillosa	Monolito	Kuo et al., 1997 a, b
	2,6	40	Franco-arcillosa	Cilindro	Ozpinar et al., 2006
Pastura	1	120	Arcillo-limosa	No específica	Arslan y Kurdali, 1996
	14,5-17	30	Arenosa	Cilindro	Van Eekeren et al., 2010
	7-12	100	Arenosa-arenoso-franca	Cilindro	Frasier et al., 2019
	8-15,6	45	Franco-arenosa	Cilindro	Bolinder et al., 2002
	13,5	100	Franco-arenosa	Cilindro	Frasier et al., 2019
	2,5	15	Franca	Cilindro	Ghimire et al., 2014
	12,5-15	100	Franca	Cilindro	Frasier et al., 2019
	2,5-3,3	60	Franco-arcillosa	Cilindro	Skinner et al., 2006
Pastizal natural	1,1-2,9	100	Arcillosa	Barreno tubular hidráulico	Ojeda y Caviglia, 2018
	15	100	Arenosa	Cilindro	Mueller et al., 2013
	14,5	100	Arenosa-arenoso-franca	Cilindro	Frasier et al., 2019
	19	100	Franco-arenosa	Cilindro	Frasier et al., 2019
	22	100	Franca	Cilindro	Frasier et al., 2019
5,8	100	Franco-arcillo-limosa	Barreno tubular hidráulico	Dietzel et al., 2017	

Como condición de referencia se presentan valores de pastizales naturales (L: línea de siembra; E: entresurco).

La raíz se elonga cuando la presión que ejerce excede la resistencia mecánica que le impone el suelo. Sin embargo, cuando encuentra zonas con alta resistencia a la penetración su elongación se reduce, viéndose alterado su diámetro y el número de raíces laterales en el eje primario. Además, se modifica su orientación hacia zonas donde halla menor resistencia. Resistencias a la penetración de 2-2,5 MPa son suficientes para impedir un desarrollo radical normal.

A medida que las raíces se anclan en el suelo para sostener la parte aérea de la planta se transforman en un sistema de refuerzo para el movimiento del suelo debido a su resistencia a la tracción y a sus propiedades de fricción y

adherencia. Este incremento en la resistencia mecánica del suelo enraizado reduce la susceptibilidad a la erosión (erodabilidad). Como ejemplos de prácticas de manejo basadas en este proceso podemos mencionar la fijación de médanos y dunas y la siembra en contorno. Esta última práctica, además de reducir el arrastre de suelo, contribuye a la disminución de la escorrentía en terrenos con pendiente.

Las raíces son órganos que se encargan de la absorción y el transporte de agua y nutrientes, ejerciendo el control sobre la productividad total de las plantas. Cuando estos recursos son escasos, la respuesta observada es, por lo general, un crecimiento de la raíz en busca del recurso limitante. Sin embargo, cabe aclarar que cada nutriente puede generar cambios específicos en la elongación y desarrollo lateral de las raíces. Además, éstas pueden emitir señales hacia la parte aérea (ácido abscísico, citoquininas) que desencadenan una serie de cambios en respuesta a dicha limitante: por ejemplo, expansión foliar, apertura o cierre de estomas. Cuando se piensa en nutrientes inmóviles, su proximidad a la raíz resulta clave para la absorción. En cambio, el enraizamiento lateral y la profundidad radical constituyen características importantes para la adquisición de nutrientes solubles y móviles, especialmente nitratos, como así también, para la absorción de agua en ambientes limitantes (mayor capacidad de exploración radical como estrategia para enfrentar déficits hídricos).

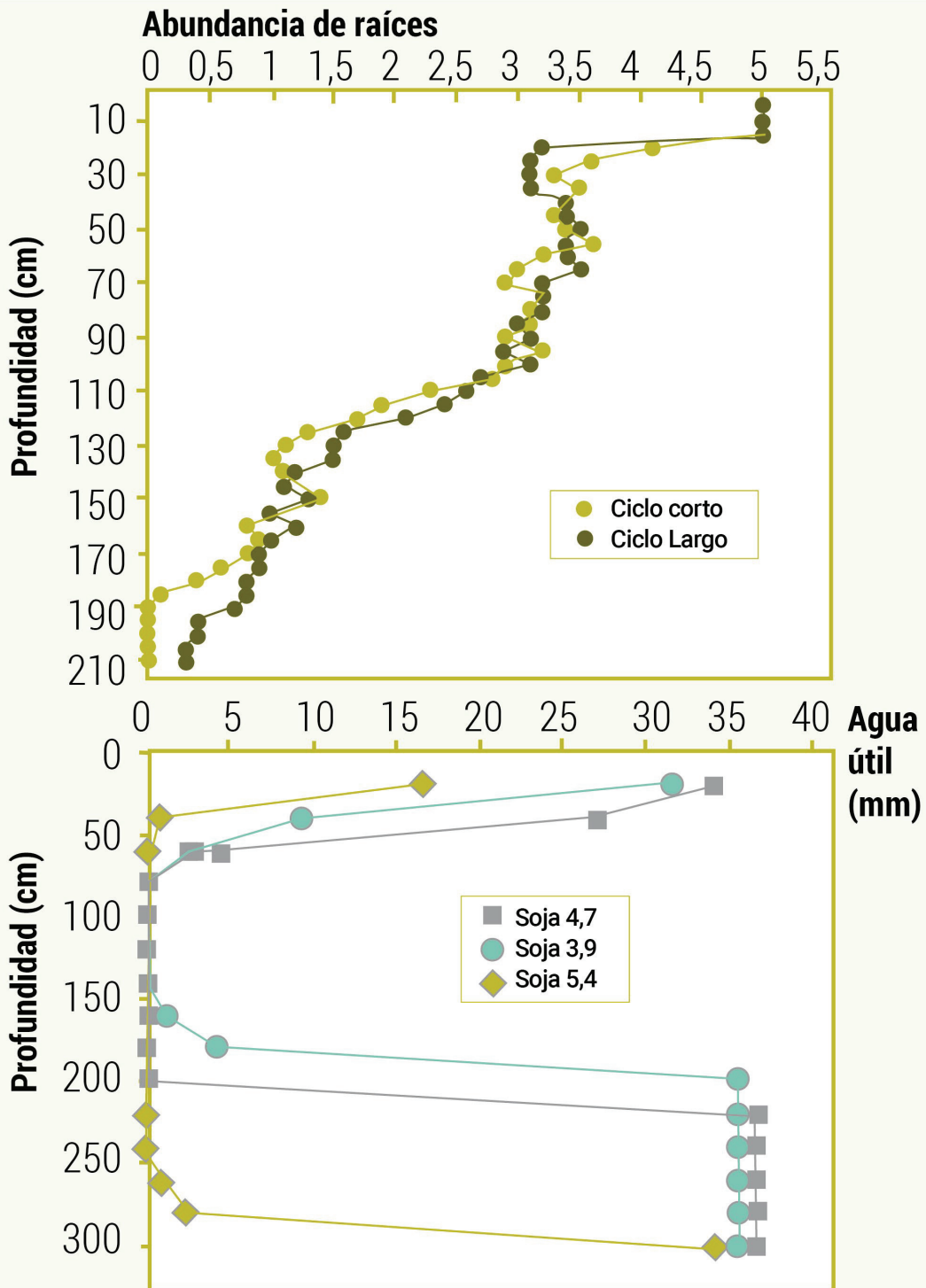
Algunas especies y cultivares pueden desarrollar una profundidad efectiva de raíces cercana a 1,5-1,6 metros; entre ellas figuran los trigos de ciclo corto, las sojas de grupo 3, los maíces ultraprecoces y la colza de primavera. Por el contrario, otras especies y cultivares alcanzan valores máximos de profundidad de raíces cercanos a los 2,2-2,5 metros. Es el caso del girasol, de la soja grupo 5, de los maíces de ciclo completo a subtropicales, y de los trigos de ciclo largo. En el gráfico 2a se presenta un ejemplo de abundancia de raíces de maíz de has-

ta 2,1 metros de profundidad en un suelo arenoso de la localidad de Anguil, La Pampa, donde el maíz de ciclo corto alcanzó una profundidad efectiva de hasta 1,8 metros, mientras que el material de ciclo largo habría superado los 2,1 metros (Saks *et al.*, 2014). Si se considera el espesor del perfil explorado por las raíces, sistemas radicales más profundos podrían extraer potencialmente entre 50 y 100 milímetros más de agua dependiendo de la textura del suelo. En el gráfico 2b se presenta la disponibilidad de agua para diferentes grupos de soja. La soja de grupo 5,4, con mayor exploración radical redujo la humedad edáfica a punto de marchitez hasta los 2,5 metros. En cambio, la de grupo 3,9 deprimió la humedad hasta el 1,4 metro (ver gráfico 2 en la página siguiente).

La presencia de napa freática también puede restringir el crecimiento de las raíces, al limitar el volumen de suelo que pueden explorar por encima de ella según la profundidad a la cual se encuentre. Como mínimo, el suelo debe contener un 10% de poros con aire para permitir la actividad respiratoria radical. Si, por el contrario, la profundidad de la napa se encuentra por debajo de los 60-80 cm, y su calidad lo amerita, puede resultar estratégico pensar en un sistema radical que utilice este recurso para incrementar su productividad. En cierto grado se han desarrollado estrategias de “acoplamiento a las napas” seleccionando cultivares con mayor profundidad efectiva de raíces (por ejemplo, grupos más largos de soja) o fechas de siembras más tempranas (trigos ciclos medios a largos) que permiten alcanzar la zona capilar de napas localizadas a mayor profundidad. Por otra parte, si la calidad de la napa presentara un riesgo de salinización, mantener el suelo con raíces todo el año resultaría estratégico para prevenir su ascenso a la superficie.

Las raíces crecen a través de poros o canales preexistentes generados por la presencia de la fauna del suelo y de cultivos previos, como así también a través de grietas generadas por procesos de humedecimiento-desecamiento. Cuando la

Gráfico 2 a y b. (a) Perfil de abundancia de raíces de maíz para dos genotipos de ciclo corto y largo en un suelo arenoso de la localidad de Anguil, La Pampa (la escala 0 a 5 indica menor a mayor abundancia de raíces obtenido mediante el método semicuantitativo de la grilla). (b) Disponibilidad de agua útil a cosecha (mm) hasta los 3 metros de profundidad para tres cultivares de soja de diferente ciclo de madurez (3,9, 4,7 y 5,4) en un suelo franco-arenoso de la localidad de Intendente Alvear, La Pampa.



raíz penetra en el suelo se producen grandes tensiones (axial y radial) que deforman los poros preexistentes. Su diámetro debe ser lo suficientemente grande (aproximadamente 100 μm) para permitir el ingreso de la raíz, aunque este valor resulta inferior para las raíces laterales más finas (20-100 μm) y para los pelos radicales (5-10 μm). A su vez, las raíces contribuyen a la formación de nuevos bioporos en el suelo circundante (rizosfera) (figura 2). Estudios recientes muestran que las especies cultivables con raíces más gruesas incrementan

Figura 2. a). Raíces de centeno incluido como cultivo de cobertura durante el barbecho largo que tiene lugar entre dos cultivos de verano (arriba); b) Cambios en el patrón de distribución de raíces en el suelo con densificación subsuperficial (abajo).



la macroporosidad del suelo, mientras que aquellas que poseen un sistema más denso de raíces finas incrementan el volumen de los microporos. Esta mejora en la macroporosidad también puede verse reflejada en el desarrollo radical del cultivo sucesor (figura 3). Sin embargo, la magnitud de estos cambios no dependería exclusivamente del sistema radical, sino también de la textura del suelo, del contenido de humedad y de la densidad aparente.

Cambios en el sistema poroso contribuirían favorablemente a la infiltración del agua en el suelo. Estudios realizados en distintas localidades de la región pampeana evidencian una relación lineal y positiva entre la infiltración acumulada y la cantidad de raíces (gráfico 3a). Lo mismo ocurrió con la infiltración básica, aunque su respuesta estuvo, además, condicionada por la condición del sitio de estudio, es decir, por la textura y la historia previa de manejo (gráfico 3b). Por el contrario, en muchos suelos cultivados el crecimiento radical

Figura 3. Cambios en el sistema radical de maíz por efecto del cultivo antecesor. Testigo (monocultura maíz); centeno y vicia. Datos de la campaña 2019/20. Módulo experimental ubicado en la localidad de B. Larroude, La Pampa.

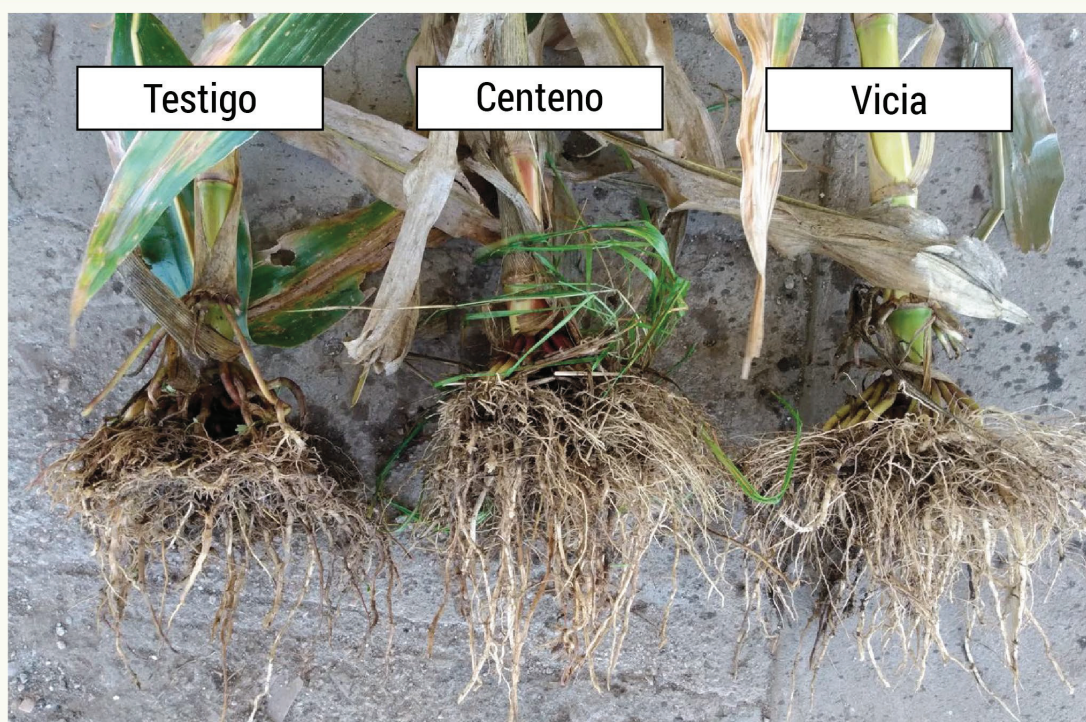
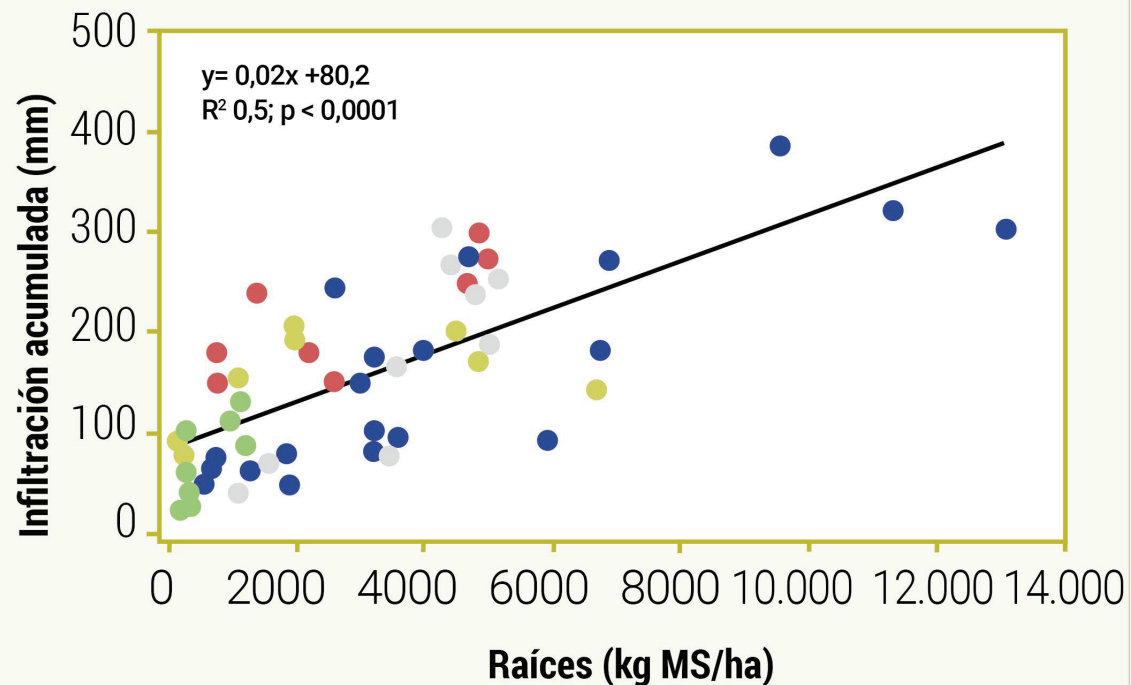
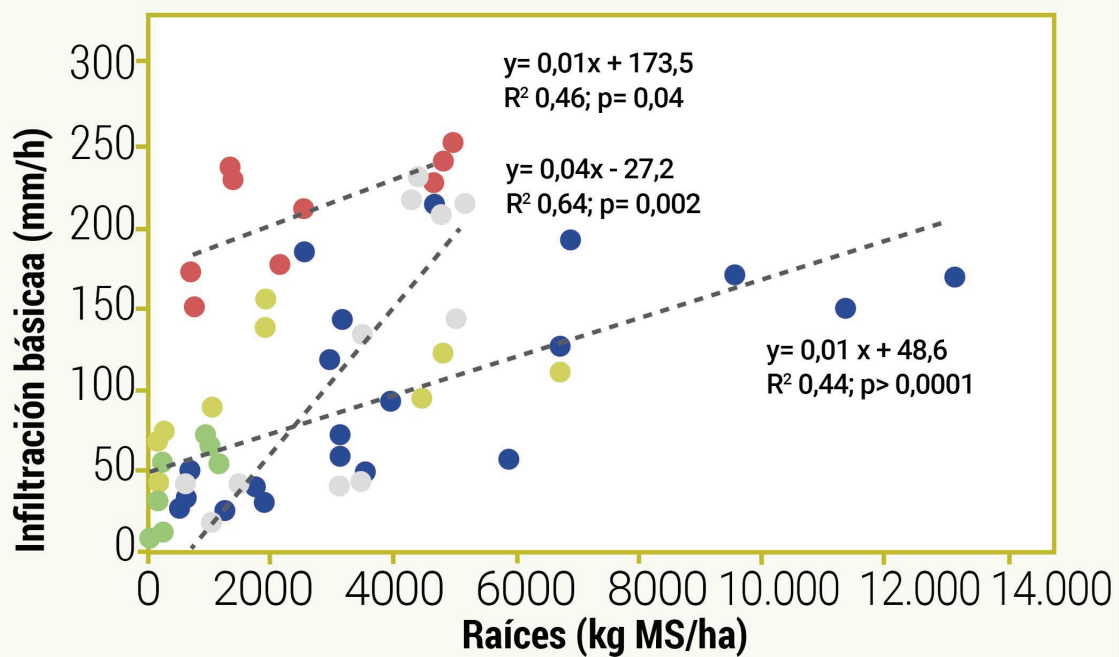


Gráfico 3. Cambios en la infiltración acumulada (a) y básica (b) en función de la biomasa de raíces de los cultivos (pasturas, cereales de invierno, vicia). Campaña 2018/19.



- Tres Lomas
- 30 de Agosto
- 9 de Julio
- Italo
- Naredo



- Tres Lomas
- 30 de Agosto
- 9 de Julio
- Italo
- Naredo

puede verse limitado por una baja macroporosidad asociada a la presencia de densificaciones. Estudios recientes muestran que la mayor parte de los suelos cultivados del país han experimentado un incremento en la susceptibilidad a la compactación, con aumentos en la densidad aparente que limitan la captación del agua de las precipitaciones, y la profundidad efectiva y distribución de las raíces.

La figura 4 muestra la arquitectura del sistema radical del girasol en respuesta a distintos grados de densificación subsuperficial: E4 sin limitaciones; E2 y E3 con limitaciones intermedias, y E1 con limitaciones severas. Los cereales de invierno incluidos como cultivos de cobertura contribuyen a mejorar las situaciones E3 y E2, pero no tienen mayor incidencia en E1. En estos casos, los estudios evidencian la conveniencia de complementar una labor mecánica (vertical) realizada en otoño con la siembra simultánea de cereales de

Figura 4. Raíces de girasol influenciadas por distintos grados de densificación (E1 a E4) en un Molisol de la región semiárida pampeana.

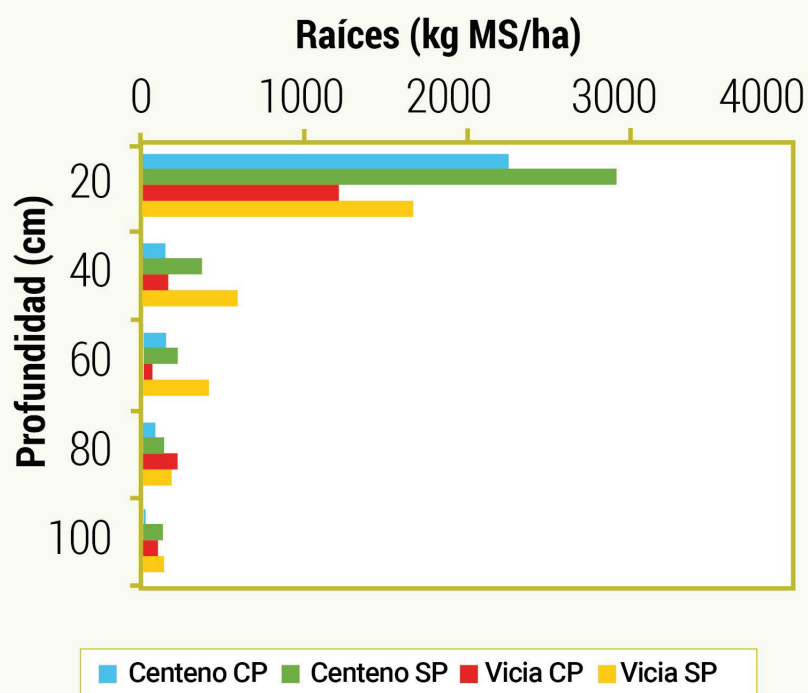
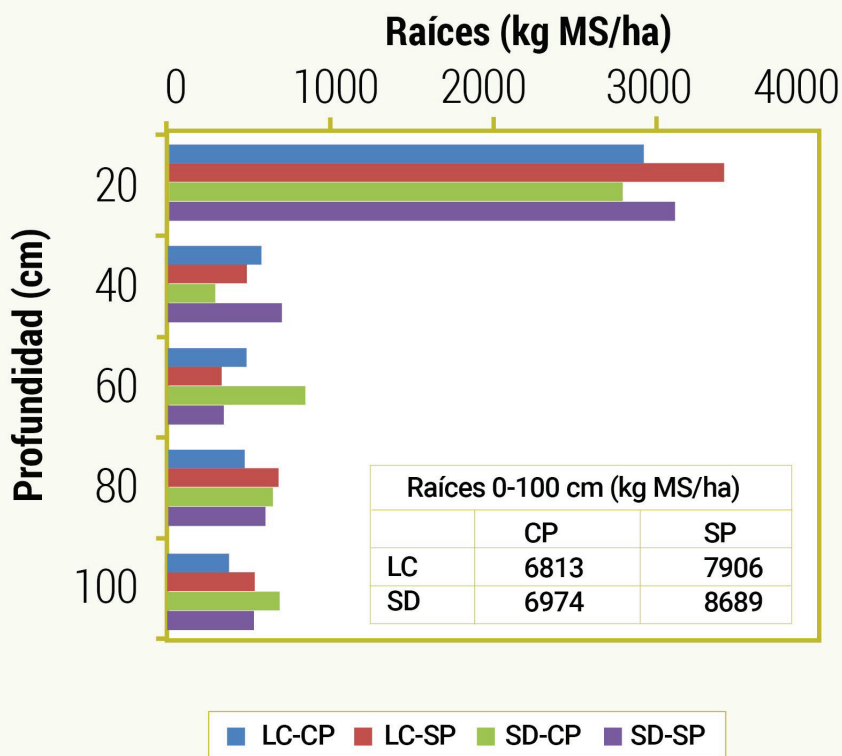


invierno. La estrategia de intervención debe responder a cada situación en función de la localización, espesor y resistencia del estrato densificado. No es conveniente extrapolar experiencias sin contar con esta información. Respecto de este tema se puede concluir que los cultivos de cobertura, solos o combinados con labor mecánica, pueden realizar una importante contribución a la recuperación de la condición física de algunos suelos. En consecuencia, pueden mejorar la captación, distribución, almacenaje y uso del agua.

También existen otras estrategias de manejo que pueden conducir a la presencia de zonas densificadas. El sistema de labranza, por ejemplo, puede generar compactaciones subsuperficiales como consecuencia del paso de la maquinaria agrícola según la profundidad de labor. De manera similar, el pastoreo de rastrojos y cultivos como parte de los sistemas mixtos puede afectar la porosidad del suelo por efecto del pisoteo continuo, en función de la humedad del suelo y de la carga animal.

El gráfico 4 se presentan dos ejemplos del impacto que tienen estas prácticas sobre la abundancia y distribución de raíces en el perfil. En función del sistema de labranza, el pastoreo representó mermas del 14 al 20% en la biomasa de raíces al metro de profundidad (gráfico 4a). Además, se observaron cambios en la distribución de raíces en el entresurco y una reducción en la cantidad de raíces en los primeros 20 centímetros cuando se pastoreó en ambos sistemas. La combinación de siembra directa con pastoreo también evidenció una llamativa disminución de raíces en el estrato 20-40 cm, a diferencia de lo que ocurrió en el resto de los tratamientos. En el gráfico 4b se presentan los patrones de distribución de raíces de vicia y centeno con y sin pastoreo. Ambas especies mostraron reducciones en su abundancia al metro de profundidad debidas al pastoreo (40 y 28% para vicia y centeno, respectivamente). A su vez, el patrón de distribución también presentó modificaciones provocadas por el pastoreo. En el

Gráfico 4. (a) Distribución de raíces de girasol hasta el metro de profundidad según sistema de labranza con y sin pastoreo en un módulo con 25 años de efecto acumulado de la localidad de Dorila, La Pampa. (b) Distribución de raíces de centeno y vicia, con y sin pastoreo durante el ciclo de cultivo en un módulo de estudio ubicado en la localidad de Naredo, provincia Buenos Aires.



caso de vicia, los cambios se observaron en los primeros 60 cm, mientras en centeno, eso ocurrió principalmente en el estrato superficial.

Las raíces pueden liberar gran variedad de compuestos orgánicos como parte del proceso de rizodeposición, el cual, representa aproximadamente el 50% del carbono de la biomasa de raíces. Estos compuestos actúan como agentes aglutinantes en la agregación de partículas minerales del suelo, favoreciendo la formación y estabilización de microagregados dentro de los macroagregados. Los exudados también intervienen en el diálogo entre la raíz y los organismos del suelo. Tal es el caso de lo que ocurre, por ejemplo, en el inicio y modulación de las asociaciones simbióticas con rizobios y micorrizas en la interacción con bacterias promotoras del crecimiento, patógenos e invertebrados herbívoros. Por lo tanto, el manejo del suelo que se realice condicionará la actividad y diversidad biológica en la rizosfera, impactando directamente sobre el ciclado de nutrientes, la estabilización de compuestos orgánicos, y la incidencia de plagas y patógenos.

La figura 5 muestra el impacto de secuencias de cultivos que permiten mantener raíces vivas durante todo el año estimulando la actividad biológica, en comparación con esquemas productivos con alta proporción de cultivos estivales y largos barbechos.

Las raíces muertas también constituyen una fuente de carbono que contribuye a la formación de materia orgánica. Cuando se descomponen por acción de la biota (microflora y fauna), aportan al suelo importantes cantidades de carbono. El compartimento de la materia orgánica que acusa el cambio es la fracción particulada (ver capítulo 5). La relación entre estas variables es lineal: la respuesta a un mayor aporte de raíces se traduce en un aumento de la materia orgánica particulada. Las raíces fragmentadas y descompuestas se

Figura 5. Secuencia de cultivos que mantienen el suelo con raíces vivas todo el año (arriba) *versus* monocultura (abajo)



amalgaman con las partículas minerales del suelo formando microagregados dentro de los macroagregados. Este proceso se ve favorecido por la presencia de compuestos orgánicos producto de la actividad microbiana, su necromasa (células muertas) y la presencia de hifas que contribuyen a la estabilización de dichos agregados y a la formación de complejos órgano-minerales. Sin embargo, la velocidad de descomposición de la materia orgánica particulada derivada de

las raíces es regulada por la protección física que ejercen los microagregados sobre el material, como así también por su calidad y por las condiciones del ambiente edáfico (temperatura y humedad). Todos estos procesos explican por qué las raíces contribuyen con una mayor proporción de carbono en el proceso de formación de materia orgánica del suelo, a diferencia de los residuos aéreos ubicados sobre la superficie, que tienen menor contacto con la matriz de suelo. Sin embargo, cabe señalar que esta relación entre el aporte de residuos (raíces) y el almacenamiento de carbono en el suelo no es lineal. Por el contrario, la capacidad de almacenar carbono de un suelo sigue la ley de incrementos decrecientes alcanzando un valor máximo de saturación que es dependiente de la textura. Por ejemplo, en suelos arenosos, el carbono aportado por las raíces permanece como material particulado susceptible a la mineralización, mientras los niveles de materia orgánica total no aumentan, incluso con aportes de raíces importantes, como ocurre en sistemas naturales. La textura limita la capacidad de captura de carbono, por lo tanto, la posible contribución que puede tener una misma práctica de uso del suelo. Es por ello que, a la hora de comparar resultados sobre la contribución de las raíces a los procesos edáficos, resulta fundamental considerar suelos con similar composición granulométrica.

Esta íntima relación entre las raíces y la materia orgánica las convierte en una “potencial” solución a muchas problemáticas derivadas del uso del suelo. Sin embargo, los cambios en las propiedades edáficas -que se ven influenciadas por la interacción suelo-raíz- ocurren como consecuencia de los procesos biológicos o físico-químicos anteriormente descritos. Lejos de simplificar la realidad, éstos nos conducen hacia el entendimiento de la complejidad que conlleva abordar el estudio del suelo.

Bibliografía

Aiken, R.M., Smucker, A. J. M. "Root System Regulation of Whole Plant Growth". *Annu. Rev. Phytopathol.* 34, 325–346. 1996.

Aimar, S., Méndez, M., Penebianco, J. "Capítulo VII: Erosión eólica. Avances de su estudio en la región semiárida de Argentina". *Manual de fertilidad y evaluación de suelos*. INTA Anguil. 2012.

Álvarez, C., Quiroga, A.R., Corro Molas, A., Lienhard, C. "Manejo sitio específico para el cultivo de soja en la región semiárida pampeana". En: *XXII Congreso Mercosoja*. Rosario, CD. 2011.

Amato, M., Pardo, A. "Root length and biomass losses during sample preparation with different screen mesh sizes". *Plant Soil* 161, 299–303. 1994.

Arslan, A. "Rainfed vetch-barley mixed cropping in the Syrian semi-arid conditions II. Water use efficiency and root distribution". *Plant Soil* 183, 149–160. 1996.

Atkinson, J.A., Rasmussen, A., Traini, R., Voß, U., Sturrock, C., Mooney, S.J., Wells, D.M., Bennett, M.J. "Branching out in roots: Uncovering form, function, and regulation". *Plant Physiol.* 166, 538–550. 2014.

Aubertin, G.M., Kardos, L.T. "Root Growth Through Porous Media Under Controlled Conditions: I. Effect of Pore Size and Rigidity". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 29, 290–293. 1965.

Austin, E. E., Wickings, K., McDaniel, M.D., Robertson, G.P., Grandy, A.S. "Cover crop root contributions to soil carbon in a no-till corn bioenergy cropping system". *GCB Bioenergy* 9, 1252–1263. 2017.

Badri, D. V., Vivanco, J. M. "Regulation and function of root exudates". *Plant, Cell Environ.* 32, 666–681. 2009.

Ball-Coelho, B.R., Roy, R.C., Swanton, C. J. "Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil". *Soil Tillage Res.* 45, 237–249. 1998.

Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., Valentine, T.A. "Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits". *J. Exp. Bot.* 62, 59–68. 2011.

Benjamin, J.G., Nielsen, D.C. "Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea". *F. Crop. Res.* 97, 248–253. 2006.

Bodner, G., Leitner, D., Kaul, H.P. "Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently". *Plant Soil* 380, 133–151. 2014.

Bolinder, M.A., Angers, D. A., Bélanger, G., Michaud, R., Laverdière, M. R. "Root biomass and shoot to root ratios of perennial forage crops in eastern Canada". *Can. J. Plant. Sci.* 82, 731–737. 2002.

Bongiorno, G., Postma, J., Bünemann, E.K., Brussaard, L., de Goede, R.G.M., Mäder, P., Tamm, L., Thuerig, B. "Soil suppressiveness to *Pythium ultimum* in ten European long-term field experiments and its relation with soil parameters". *Soil Biol. Biochem.* 133, 174–187. 2019.

Buyanovsky, G.A., Wagner, G.H. "Post-harvest residue input to cropland". *Plant Soil* 93, 57–65. 1986.

Cannell, R.Q., Belford, R.K., Blackwell, P.S., Govi, G., Thomson, R.J. "Effects of waterlogging on soil aeration and on root and shoot growth and yield of winter oats (*Avena sativa* L.)". *Plant Soil* 85, 361–373. 1985.

Chirinda, N., Olsen, J. E., Porter, J. R. "High root biomass for cereal crops increases carbon sequestration in organic arable systems". In: 17th *IFOAM Organic World Congress*. pp. 2–5. 2011.

Dardanelli, J.L., Bachmeier, O.A., Sereno, R., Gil, R. "Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll". *F. Crop. Res.* 54, 29–38. 1997.

Dexter, A.R. "Compression of soil around roots". *Plant Soil* 97, 401–406. 1987.

Dietzel, R., Liebman, M., Archontoulis, S. "A deeper look at the relationship between root carbon pools and the vertical distribution of the soil carbon pool". *SOIL Discuss.* 1–20. 2017.

Drew, M.C. "Comparison of the effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley". *New Phytol.* 75, 497–490. 1975.

Dwyer, L.M., Ma, B.L., Stewart, D.W., Hayhoe, H.N., Balchin, D., Culley, J.L.B., McGovern, M. "Root mass distribution under conventional and conservation tillage". *Can. J. Soil Sci.* 76, 23–28. 1996.

Frasier, I., Quiroga, A., Fernández, R., Álvarez, C., Gómez, F., Scherger, E., Gili, A., Noellemeyer, E. "Soil type, land-use and -management as drivers of root-C inputs and soil C storage in the semiarid pampa region, Argentina". *Soil Tillage Res.* 192, 134–143. 2019.

Gaggioli, C. *Alternativas de cultivos tendientes a mejorar la sustentabilidad de los sistemas de producción de la Región Semiárida Pampeana*. Universidad Nacional del Sur. 2020.

Ghimire, R., Norton, J.B., Pendall, E. "Alfalfa-grass biomass, soil organic carbon, and total nitrogen under different management approaches in an irrigated agroecosystem". *Plant Soil* 374, 173–184. 2014.

Golberg, D., Ruiz, M., Quiroga, A.R., Fernández, A. *¿Qué le sucede a un cultivo cuando no llueve?* INTA.93 pp. 2011.

Golchin, A., Oades, J., Skjemstad, J., Clarke, P. "Soil structure and carbon cycling". *Aust. J. Soil Res.* 32, 1043. 1994.

Gregory, P., Lake, J., Rose, D. *Root Development and Function*. Cambridge University Press, Cambridge. 1987.

Hamblin, A.P. "The influence of soil structure on water movement, crop root growth, and water uptake". *Adv. Agron.* 38, 95–158. 1986.

Hirte, J., Leifeld, J., Abiven, S., Mayer, J. "Maize and wheat root biomass, vertical distribution, and size class as affected by fertilization intensity in two long-term field trials". *F. Crop. Res.* 216, 197–208. 2018.

Jastrow, J.D., Amonette, J. E., Bailey, V. L. "Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration". *Clim. Change* 80, 5–23. 2007.

Jones, D.L., Nguyen, C., Finlay, R.D. "Carbon flow in the rhizosphere: carbon trading at the soil–root interface". *Plant Soil* 321, 5–33. 2009.

Kirby, J. M., Bengough, A.G. "Influence of soil strength on root growth: Experiments and analysis using a critical-state model". *Eur. J. Soil Sci.* 53, 119–127. 2002.

Kong, A.Y.Y., Six, J. "Tracing Root vs. Residue Carbon into Soils from Conventional and Alternative Cropping Systems". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 1201–1210. 2010.

Kudoyarova, G.R., Dodd, I.C., Veselov, D.S., Rothwell, S.A., Yu.Veselov, S. "Common and specific responses to availability of mineral nutrients and water". *J. Exp. Bot.* 66, 2133–2144. 2015.

Kuo, S., Sainju, U.M., Jellum, E. J. "Winter Cover Crop Effects on Soil Organic Carbon and Carbohydrate in Soil". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 145. 1997.

Kuo, S, Sainju, U.M., Jellum, E. J. "Winter Cover Cropping Influence on Nitrogen in Soil". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 1392–1399. 1997.

Maeght, J.-L., Rewald, B., Pierret, A. "How to study deep roots—and why it matters". *Front. Plant Sci.* 4, 1–14. 2013.

Mazzilli, S.R., Kemanian, A.R., Ernst, O.R., Jackson, R.B., Piñeiro, G. "Greater humification of belowground than aboveground biomass carbon into particulate soil organic matter in no-till corn and soybean crops". *Soil Biol. Biochem.* 85, 22–30. 2015.

Mueller, K.E., Tilman, D., Fornara, D. a., Hobbie, S.E. "Root depth distribution and the diversity–productivity relationship in a long-term grassland experiment". *Ecology* 94, 787–793. 2013.

Nichols, V.A., Ordóñez, R.A., Wright, E.E., Castellano, M.J., Liebman, M., Hatfield, J. L., Helmers, M., Archontoulis, S. V. "Maize root distributions strongly associated with water tables in Iowa, USA". *Plant Soil* 444, 225–238. 2019.

Oderiz, A., Uhaldegaray, M., Frasier, I., Quiroga, A.R., Amiotti, N., Zalba, P. "Raíces de cultivos de cobertura: cantidad, distribución e influencia sobre el N mineral". *Cienc. del suelo* 35, 249–258. 2017.

Ojeda, J. J., Caviglia, O.P., Agnusdei, M.G. "Vertical distribution of root biomass and soil carbon stocks in forage cropping systems". *Plant Soil* 423, 175–191. doi:10.1007/s11104-017-3502-8. 2018.

Ola, A., Dodd, I.C., Quinton, J.N. "Can we manipulate root system architecture to control soil erosion?" *SOIL Discuss.* 2, 265–289. 2015.

Oldroyd, G.E.D., Leyser, O., 2020. "A plant's diet, surviving in a variable nutrient environment". *Science* (80).368, eaba0196.

Ordóñez, R.A., Castellano, M.J., Hatfield, J.L., Licht, M.A., Wright, E.E., Archontoulis, S. V., 2018. "A solution for sampling position errors in maize and soybean root mass and length estimates". *Eur. J. Agron.* 96, 156–162.

Ozpinar, S., Baytekin, H. "Effects of tillage on biomass, roots, N-accumulation of vetch (*Vicia sativa* L.) on a clay loam soil in semi-arid conditions". *F. Crop. Res.* 96, 235–242. 2006.

Pietola, L., Alakukku, L. "Root growth dynamics and biomass input by Nordic annual field crops". *Agric. Ecosyst. Environ.* 108, 135–144. 2005.

Pollen-Bankhead, N., Simon, A., Thomas, R.E. "The Reinforcement of Soil by Roots: Recent Advances and Directions for Future Research". In: *Treatise on Geomorphology*. Elsevier Ltd., pp. 107–124. 2013.

Puget, P., Drinkwater, L.E.E. "Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a Leguminous Green Manure". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 771–779. 2001.

Quiroga, A., Oderiz, A., Uhaldegaray, M., Alvarez, C., Scherger, E., Fernández, R., Frasier, I., 2016. "Influencia del uso de suelos sobre indicadores físicos de compactación". *Semiárida Rev. Fac. Agron. UNLPampa* 26, 19–26. 2001.

Quiroga, A.R., Buschiazzo, D.E., Peinemann, N. "Soil organic matter particle size fractions in soils of the semiarid Argentinian Pampas". *Soil Sci.* 161, 104–108. 1996.

Redin, M., Guénon, R., Recous, S., Schmatz, R., de Freitas, L., Aita, C., Giacomini, S. "Carbon mineralization in soil of roots from twenty crop species, as affected by their chemical composition and botanical family". *Plant Soil* 378, 205–214. 2014.

Rellán-Álvarez, R., Lobet, G., Dinneny, J.R., 2016. "Environmental Control of Root System Biology". *Annu. Rev. Plant Biol.* 67, 619–642.

Saks, M., Fernández, R., Gili, A., Quiroga, A.R. "Efecto de la fertilización con nitrógeno en distintos genotipos de maíz". *XXIV Congr. Argentino la Cienc. del Suelo II Reun. Nac. "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas" Producción sustentable en ambientes frágiles.* 2014.

Shahzad, T., Chenu, C., Genet, P., Barot, S., Perveen, N., Mougín, C., Fontaine, S. "Contribution of exudates, arbuscular mycorrhizal fungi and litter depositions to the rhizosphere priming effect induced by grassland species". *Soil Biol. Biochem.* 80, 146–155. 2015.

Sievers, T., Cook, R.L. "Aboveground and Root Decomposition of Cereal Rye and Hairy Vetch Cover Crops". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 82, 147–155. 2018.

Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A., Paustian, K. "Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturatin of soils". *Plant Soil* 241, 155–176. 2002.

Skinner, R. H., Sanderson, M. A., Tracy, B. F., Dell, C. J. "Above- and below-ground productivity and soil carbon dynamics of pasture mixtures". *Agron. J.* 98, 320–326. 2006.

Skuodine, R., Tomchuk, D. "Root Mass and Root To Shoot Ratio. Rom". *Agric. Res.* 32, 209–219. 2015.

Tahir, M.M., Recous, S., Aita, C., Schmatz, R., Pilecco, G.E.G.E., Giacomini, S.J. "In situ roots decompose faster than shoots left on the soil surface under subtropical no-till conditions". *Biol. Fertil. Soils* 52, 853–865. 2016.

Van Eekeren, N., Bos, M., de Wit, J., Keidel, H., Bloem, J. "Effect of individual grass species and grass species mixtures on soil quality as related to root biomass and grass yield". *Appl. Soil Ecol.* 45, 275–283. 2010.