



FACULTAD DE AGRONOMÍA
Universidad Nacional de La Pampa

APORTE DE RAÍCES DE CULTIVOS DE COBERTURA Y SU IMPACTO SOBRE EL USO Y CAPTACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO

Proyecto de Trabajo final de graduación para obtener el título de Ingeniero Agrónomo

Autor:

Javier Horacio Madariaga
Matías Joel Olivieri

Directora:

Dra. Ileana Frasier
*EEA "Guillermo Covas", INTA Anguil.
Investigadora del Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas.*

Codirector:

Dr. Alberto R. Quiroga
*Cátedra de Edafología y Manejo de suelos, Facultad de Agronomía, UNLPam.
EEA "Guillermo Covas", INTA Anguil.*

Evaladores:

Dr. Cristian Alvarez
Agencia de Extensión Gral. Pico, INTA Anguil

Dra. Elke Noellemeyer
Cátedra de Edafología y Manejo de suelos, Facultad de Agronomía, UNLPam.

RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	5
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
HIPÓTESIS DE TRABAJO	7
MATERIALES Y MÉTODOS	7
<i>Descripción de los tratamientos</i>	8
Tabla 1: Tratamientos experimentales en los distintos ensayos con cultivos de cobertura.	9
Tabla 2: Régimen hídrico y principales propiedades edáficas de los sitios de estudio.	10
<i>Determinaciones</i>	10
<i>Análisis estadístico</i>	11
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
<i>Sitio F. Ameghino</i>	11
Figura 2: Biomasa aérea (BA), radical hasta el metro de profundidad (BR; kg MS/ha) y la relación raíz: parte aérea (BR/BA) al momento del secado de los cultivos de cobertura en el sitio F. Ameghino. <i>Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).</i>	12
Figura 3: Patrón de distribución de raíces (kg MS/ha) al momento de secado de los cultivos de cobertura en el sitio F. Ameghino. <i>Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).</i>	13
Figura 4: Infiltración acumulada (mm) al finalizar el ciclo de los cultivos de cobertura en el sitio F. Ameghino. <i>Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).</i>	14
Figura 5: Eficiencia del uso del agua (kg MS/ha.mm) particionada en biomasa aérea (EUAb _a) y biomasa radicular (EUAb _r) para los distintos tratamientos con cultivos de cobertura en el sitio F. Ameghino. <i>Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos para las variables EUAb_a, EUAb_r (mayúsculas) y EUA total (aérea + radical, minúsculas) ($p < 0.05$).</i>	15
<i>Sitio Pellegrini</i>	15
Figura 6: Biomasa aérea (BA), radical (BR) y la relación raíz: parte aérea (BR/BA) al momento del secado de los cultivos de cobertura en el sitio Pellegrini. <i>Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).</i>	16

Figura 7: Patrón de distribución de raíces (kg MS/ha) al momento de secado de los cultivos de cobertura en el sitio Pellegrini. *Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).* 17

Figura 8: Infiltración acumulada (mm) al finalizar el ciclo de los cultivos de cobertura en el sitio Pellegrini. *Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).* 18

Figura 9: Eficiencia del uso del agua (kg MS/ha.mm) particionada en biomasa aérea (EUAb_a) y biomasa radicular (EUAb_r) para los distintos cultivos de cobertura en el Pellegrini. *Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos para las variables EUAb_a, EUAb_r (mayúsculas) y EUA total (aérea + radical, minúsculas) ($p < 0.05$).* 19

Sitio B. Larroude 19

Figura 10: Biomasa aérea (BA), radical (BR) y la relación raíz: parte aérea (BR/BA) al momento del secado de los cultivos de cobertura en el sitio B. Larroude. *Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).* 20

Figura 11: Patrón de distribución de raíces (kg MS/ha) al momento de secado de los cultivos de cobertura en el sitio B. Larroude. *Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).* 21

Figura 12: Infiltración acumulada (mm) al finalizar el ciclo de los cultivos de cobertura en el sitio B. Larroude. *Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).* 22

Figura 13: Eficiencia del uso del agua (kg MS/ha.mm) particionada en biomasa aérea (EUAb_a) y biomasa radicular (EUAb_r) para los distintos cultivos de cobertura en el sitio B. Larroude. *Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos para las variables EUAb_a, EUAb_r (mayúsculas) y EUA total (aérea + radical, minúsculas) ($p < 0.05$).* 23

Sitio 30 de Agosto 23

Figura 14: Biomasa aérea (BA), radical (BR) y la relación raíz: parte aérea (BR/BA) al momento del secado de los cultivos de cobertura en el sitio 30 de Agosto. *Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).* 24

Figura 15: Patrón de distribución de raíces (kg MS/ha) al momento de secado de los cultivos de cobertura en el sitio 30 de Agosto. *Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).* 25

Figura 16: Infiltración acumulada (mm) al finalizar el ciclo de los cultivos de cobertura en el sitio 30 de Agosto. *Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).* 26

Figura 17: Eficiencia del uso del agua (kg MS/ha.mm) particionada en biomasa aérea (EUAb_a) y biomasa radicular (EUAb_r) para los distintos cultivos de cobertura en el sitio 30 de Agosto. *Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos para las variables EUAb_a, EUAb_r (mayúsculas) y EUA total (aérea + radical, minúsculas) (p<0.05).* 27

Sitio Santa Rosa

27

Figura 18: Biomasa aérea (BA), radical (BR) y la relación raíz: parte aérea (BR/BA) al momento del secado de los cultivos de cobertura en el sitio Santa Rosa (L.P.) *Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos (p<0.05).* 28

Figura 19: Patrón de distribución de raíces (kg MS/ha) al momento de secado de los cultivos de cobertura en el sitio Santa Rosa (L.P.). *Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos (p<0.05).* 29

Figura 20: efecto de la inclusión de especies utilizadas como cultivo de cobertura (CC) sobre la infiltración acumulada. *Las letras indican diferencias entre tratamientos para cada cultivo (p<0.05).* 30

Figura 21: Eficiencia del uso del agua (kg MS/ha.mm) particionada en biomasa aérea (EUAb_a) y biomasa radicular (EUAb_r) para los distintos cultivos de cobertura en Santa Rosa (L.P.). *Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos para las variables EUAb_a, EUAb_r (mayúsculas) y EUA total (aérea + radical, minúsculas) (p<0.05).* 31

Relaciones entre las variables

31

Figura 22: Relación entre la eficiencia de uso de agua de la biomasa aérea (kg MS/ha.mm) y la biomasa de raíces totales hasta el metro de profundidad (kg MS/ha) en los diferentes sitios de estudio clasificados según el régimen de humedad del suelo. 32

Figura 23: Relación entre la infiltración acumulada (mm) y la biomasa radical en los primeros 20 cm del perfil de suelo (kg MS/ha) para los diferentes sitios de estudio. 33

Tabla 3: Tabla resumen de las diferencias en la infiltración acumulada registradas para cada tratamiento y sitio de estudio. 34

CONSIDERACIONES FINALES

34

BIBLIOGRAFIA

35

RESUMEN

El objetivo fue estudiar la contribución de la inclusión de cultivos de cobertura a base de una, dos o más especies combinadas en términos de biomasa aérea y raíces, y el impacto sobre el uso y captación de agua en los diferentes tipos de suelo de la región semiárida y sub-húmeda pampeana. Los ensayos se realizaron en 5 sitios: F. Ameghino, 30 de Agosto, Pellegrini (Buenos Aires), B. Larroude y Santa Rosa (La Pampa). Los tratamientos correspondieron a diferentes especies de gramíneas (centeno, avena) y leguminosas (vicia villosa y trébol persa) utilizadas solas o consociadas (policultivo). Los tratamientos fueron dispuestos en un diseño en franjas con 3 repeticiones. En suelo se determinó textura, materia orgánica total, nitrógeno total, fósforo, pH, densidad aparente y humedad edáfica. En los cultivos de cobertura se determinó biomasa aérea, radical, relación raíz/parte aérea, infiltración acumulada y eficiencia de uso de agua de cada tratamiento. Los resultados mostraron que la partición raíz: biomasa aérea estuvo condicionada por el tipo de cultivo de cobertura que se utilice y el régimen de humedad de cada sitio. Suelos de régimen ústico mostraron mayor partición a raíz y dicho incremento se tradujo en aumentos en la eficiencia de uso del agua. En general las gramíneas presentaron una mejor eficiencia que las especies leguminosas. Además aquellos cultivos de cobertura que presentaron mayores volúmenes de raíces tuvieron mayor infiltración.

ABSTRACT

The objective was to study the contribution of cover crops inclusion based on one, two or more combined species in terms of aerial and root biomass, and the impact on water use efficiency in different soil types in semi-arid and sub-humid pampa regions. Trials were carried out in 5 sites: F. Ameghino, August 30, Pellegrini (Buenos Aires), B. Larroude and Santa Rosa (La Pampa). Treatments correspond to different grasses (rye, oats) and legumes (vetch, clover) species used alone or in association (polyculture). Treatments were arranged in a strip design with three replicates. In soil, texture, total organic matter, total nitrogen, phosphorus, pH, bulk density and soil water content were determined. In the cover crops, aerial and root biomass, root to aerial ratio, accumulated infiltration and water use efficiency of each treatment were determined. Results showed that root to aerial biomass ratio were conditioned by cover crop specie and soil moisture regime of each site. Soils with ustic regime showed greater root partitioning with increases in water use efficiency. In general, grasses showed better water use efficiencies than legume species. In addition, those cover crops that presented higher volumes of roots had greater accumulated infiltration.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción de la región semiárida y subhúmeda pampeana han experimentado importantes cambios durante los últimos 15 años en la secuencia/rotación de cultivos. En muchos casos el proceso de agriculturización, a partir de una mayor participación de cultivos de verano ha significado una importante reducción en el aporte de residuos y en los contenidos de materia orgánica, acentuándose los procesos de degradación física (Blanco-Canqui y Lal, 2009). En ese sentido, los cultivos de cobertura constituyen una estrategia clave para mejorar la sustentabilidad de los sistemas agrícolas debido a los múltiples beneficios que proporcionan asociados con la atenuación de la pérdida de C de los suelos, la agregación del suelo, el aumento de la infiltración, captura nutrientes móviles, control de malezas entre otras (Quiroga et al., 2009; Fernández et al., 2012; Álvarez et al., 2013; Restovich y Andriulo, 2013; Álvarez et al., 2017; Frasier et al., 2017a). En general, las gramíneas que se utilizan para tal fin poseen una mayor influencia sobre la condición física de los suelos mientras que las leguminosas inciden en mayor grado sobre la dinámica del nitrógeno. Se ha propuesto que el uso de una mayor diversidad de especies combinadas en una misma mezcla mejoraría la provisión de servicios de los agroecosistemas (Smith et al., 2014; White et al., 2017; Finney y Kaye, 2017), y aparentemente, utilizar especies que se complementan en sus características funcionales sería clave para aumentar la multifuncionalidad del sistema y su sustentabilidad (Schipanski et al., 2014; Blesh, 2017). En ese sentido, varios trabajos han demostrado que la consociación gramínea-leguminosa optimiza los beneficios asociados con el uso de cada especie en forma individual (Sainju et al., 2005; Tosti et al., 2012; Frasier et al., 2017b). Sin embargo, pocos estudios han evaluado en profundidad los beneficios del uso de más de dos especies (policultivos) como cultivos de cobertura.

En los últimos años se ha puesto especial atención en las diferencias que presentan las distintas especies que se utilizan como cultivos de cobertura, no solo en su productividad aérea y grado de precocidad sino también en la cantidad y distribución de su sistema radicular (Frasier et al., 2014; Oderiz et al., 2017). Este es un aspecto que puede contribuir a la comprensión de la habilidad competitiva de una especie para captar los recursos (agua, nutrientes), sumado al rol que cumplen las raíces en la formación de materia orgánica del suelo (Kong y Six, 2010; Kätterer et al., 2011). También puede ser planteado como objetivo incrementar la presencia de raíces cuando se pretende mejorar la captación de agua a través de un aumento de la macroporosidad y la infiltración de agua. En ese sentido, las raíces contribuirían con la formación de nuevos bioporos. Estudios recientes muestran que las especies cultivables con raíces más gruesas

aumentaron la macroporosidad del suelo, mientras que las especies con un sistema más denso de raíces finas incrementaron el volumen de microporos en el suelo (Bodner et al., 2014). Sin embargo, la magnitud de estos cambios no solo dependerían del sistema radical (arquitectura) sino también de la textura del suelo, el contenido de humedad y la densidad aparente. Conocer la configuración espacial que adopta el sistema radical durante su crecimiento permitiría planificar qué especie o especies pueden tener un mayor efecto sobre la propiedad física que se desea influenciar.

OBJETIVO GENERAL

Estudiar la contribución de los cultivos de cobertura a base de una, dos o más especies combinadas en términos de biomasa aérea, raíces, y de su impacto sobre el uso y captación de agua en el suelo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Evaluar el efecto del régimen hídrico y el tipo de suelo sobre la productividad total (aérea + raíces) de los cultivos de cobertura y la partición raíz: biomasa aérea.
2. Evaluar la distribución de raíces en el perfil de diferentes especies (gramíneas y leguminosas) solas y consociadas.
3. Valorar la eficiencia de uso del agua para producir biomasa aérea y raíces de las diferentes especies solas o consociadas.
4. Relacionar la abundancia de raíces y la infiltración de agua en el suelo.

HIPÓTESIS DE TRABAJO

1. El tipo de suelo, la especie (arquitectura sistema radicular) utilizada como cultivo de cobertura y el régimen hídrico condicionan la partición raíz: biomasa aérea.
2. La inclusión de cultivos de cobertura a base de gramíneas aportará más raíces al sistema mejorando la captación de agua y la infiltración.
3. Combinar diferentes especies en la mezcla mejoraría los beneficios aportados por las especies en forma individual (eficiencia en la producción de biomasa e infiltración).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro de la región semiárida y sub-húmeda pampeana y comprende las localidades de F. Ameghino, 30 de Agosto y Pellegrini al Oeste de la Provincia de Buenos Aires y, las localidades de Bernardo Larroude y Santa Rosa al Norte y Centro de la Provincia de La Pampa. La precipitación media anual ronda entre los 900 y 1000 mm en el caso de F. Ameghino con una temperatura media anual de 16,5°C dando lugar a ambientes subhúmedos. Los restantes sitios ubicados al Oeste de la provincia de Buenos Aires, subregión de las planicies medanosas, presentan un clima templado subhúmedo seco con temperaturas medias anuales que varía entre los 15,5-16°C (Vergara et al., 2005). Las precipitaciones medias son de 800-900 mm, presentando una alta variabilidad anual, siendo poco representativos sus valores medios, con mínimos de 500 y máximos de 1.500 mm. La localidad de 30 de Agosto registra una media anual de 855 mm, según datos de la estación meteorológica de la Escuela de Educación Secundaria Agraria de 30 de Agosto (serie 1984-2016). Para el sitio B. Larroude (Norte provincia de La Pampa), las precipitaciones tienen un régimen preferentemente estival o monzónico con una media anual de 850 mm y una temperatura media anual de 15,9 °C (serie 1961-2003) según el Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa (<https://recursosnaturales.lapampa.edu.ar/>). El sitio ubicado al Norte de Santa Rosa (L.P) más precisamente en la Facultad de Agronomía se encuentra en la subregión de las planicies con tosca, la cual condiciona la profundidad del perfil y posterior desarrollo radicular de las especies cultivables. La región cuenta con un régimen medio anual de precipitaciones de 765 mm (serie de 1975-2005), T° media anual de 15,5°C. Las mayores precipitaciones medias mensuales se producen en el semestre estival (octubre a marzo) con picos mayores en octubre y/o marzo, siendo el mes de menores lluvias agosto.

Dentro del área de estudio se seleccionaron cinco sitios correspondientes a la red de ensayos de cultivos de cobertura establecidos en 2018 en campo de productores CREA y AAPRESID en convenio con el INTA y la Universidad Nacional de La Pampa (Figura 1).

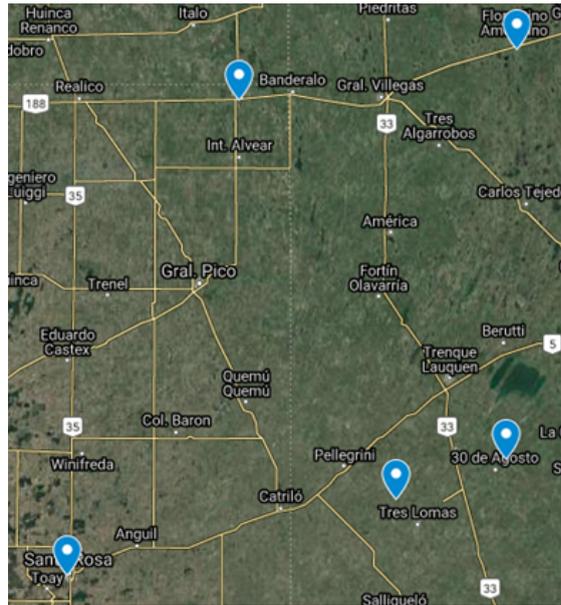


Figura 1: Área de estudio donde se identifican los sitios evaluados

Descripción de los tratamientos

En todos los sitios se incluyeron como cultivos de cobertura diferentes especies de gramíneas y leguminosas de invierno, las cuales fueron establecidas al inicio del barbecho largo que media entre dos cultivos de verano destinados a cosecha de grano (maíz o soja) sembrados entre fines de noviembre y principios de diciembre según el sitio. A fin de contrastar los efectos de los cultivos de cobertura se incluyó un tratamiento testigo (barbecho largo sin cultivo de cobertura). Las especies utilizadas fueron centeno (*Secale cereale*), avena (*Avena sativa* o *strigosa*), vicia villosa (*Vicia villosa*) y trébol persa (*Trifolium resupinatum*) solas o consociadas según el sitio de estudio (Tabla 1).

Tabla 1: Tratamientos experimentales en los distintos ensayos con cultivos de cobertura.

Sitio	Testigo	Centeno	Vicia	Vicia-Centeno	Trébol	Avena	Policultivos (3 o más especies)
Ameghino	X	X	X			X	X
30 de Agosto	X		X	X	X		
Pellegrini	X	X	X	X	X	X	
Santa Rosa	X	X	X	X			
Larroude	X	X	X				X

Todos ellos los tratamientos fueron sembrados durante el mes de abril en un diseño en franjas con 3 repeticiones de 10 x 20 a 50 m de largo según el sitio. Las densidades de siembra fueron de 30-40 kg/ha para centeno, vicia y avena; 10 kg/ha para trébol persa y en el caso de los policultivos se utilizaron proporciones con un 50-70% de leguminosa/s completando el resto con gramínea/s. El sistema de labranza adoptado fue la siembra directa. Los suelos de los cinco sitios corresponden a Molisoles que en una transecta de Oeste a Este están representados por Paleustoles petrocálcicos, Haplustoles y Hapludoles típicos y énticos. La clase textural varió entre franco arenoso y franco con contenidos de arcilla + limo variables entre 30 y 52%. Las propiedades edáficas de cada uno de los sitios se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Régimen hídrico y principales propiedades edáficas de los sitios de estudio.

Sitio	Régimen hídrico	Suelo	A+L (%)	MOT (%)	IMO	NT(%)	P Bray (ppm)	pH
Ameghino	údic	Hapludol éntico	30	2,1	7,0	0,11	6,8	5,5
30 de Agosto	údic	Hapludol típico	40	2,5	6,3	0,13	5,7	4,9
Pellegrini	ústico	Haplustol éntico	32	1,9	5,9	0,1	6	6,4
Santa Rosa	ústico	Paleustol petrocalcico	52	2,1	4,0	0,09	15,4	6,9
Larroude	údic	Hapludol típico	35	1,7	4,7	0,08	18	6

Determinaciones

- **Caracterización de los sitios:** En cada sitio de estudio se tomaron muestras compuestas de suelo de los primeros 20 cm y se determinaron las siguientes propiedades edáficas: textura (método de la pipeta Robinson), materia orgánica mediante el método de oxidación de carbono orgánico con dicromato (Bremner y Jenkinson, 1960), nitrógeno total (Kjeldahl), fósforo disponible (Bray y Kurtz, 1945) y pH en agua (1:2.5).

- **Productividad aérea y de raíces.** Previo al secado de los cultivos de cobertura se determinó la biomasa aérea a partir del peso seco del material recolectado dentro de un área conocida (aro de 0.25 m²). La biomasa de raíces se determinó por el método propuesto por Frasier et al. (2016) utilizando un barreno tubular hasta el metro de profundidad de suelo estratificando cada 20 cm valorando la abundancia de raíces en el entresurco y sobre la línea de siembra. A partir de estas variables se calculó la relación raíz: parte aérea de cada tratamiento y se confeccionaron los perfiles de distribución de raíces en cada tipo de suelo.

- **Eficiencia de uso del agua.** Las eficiencias de uso del agua se determinaron de acuerdo con la ecuación [1] (Quiroga et al., 2006) incluyendo en el cálculo la biomasa de raíces al metro y los usos consuntivos a partir de la ecuación [2] (López y Arrúe, 1997). Los contenidos hídricos del suelo se realizaron a intervalos de 20 cm hasta una profundidad de 1 m. A partir del dato de

densidad aparente (método de los cilindros) se calcularon las láminas de agua en diferentes momentos.

$$\text{EUA total (kg MS/ha.mm)} = \text{Productividad aérea y radicular (kg MS/ha)} / \text{UC (mm)} \quad [1]$$

$$\text{UC} = \text{AT}_i + \text{Pp} - \text{AT}_f \quad [2]$$

Donde:

AT_i : Agua útil inicial al metro de profundidad (mm)

Pp : Precipitaciones acumuladas durante el ciclo del cultivo (mm)

AT_f : Agua útil final al metro de profundidad (mm)

La humedad se determinó por el método gravimétrico.

- Infiltración por el método del anillo simple. Se determinó la infiltración acumulada a los 60 minutos y la tasa de infiltración básica utilizando 6 repeticiones por cada tratamiento (Bouwe, 1986).

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante análisis de la varianza (ANOVA), previa corroboración de los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia. La comparación de medias se realizó por el método de Fisher con un nivel de significancia del 5%. Se utilizaron herramientas de regresión simple para establecer relaciones entre las variables medidas. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software Infostat (Di Rienzo et al., 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sitio F. Ameghino

El tipo de suelo fue clasificado como un Hapludol éntico, con un 30% de limo + arcilla, 2.1% de materia orgánica total (IMO 7) y pH de 5.5 (Tabla 2). Este sitio tiene un régimen hídrico údico. Las precipitaciones registradas durante el ciclo de los cultivos de cobertura fueron de 254 mm, partiendo con un contenido inicial de agua a la siembra de 192 mm en el perfil del suelo. Es

decir, una oferta total de agua de 346 mm. En consecuencia la producción de materia seca aérea al momento del secado de los cultivos cobertura fue 8522 kg MS/ha para el tratamiento de policultivo, 7984 kg MS/ha para centeno, no presentando diferencias estadísticamente significativas entre ellos, siendo estos tratamientos los de mayor producción. En segundo lugar, la producción área de vicia y avena no presentaron diferencias significativas entre sí, obteniéndose valores promedio de biomasa aérea de 5858 kg MS/ha y 5480 kg MS/ha respectivamente (Figura 2). En lo que respecta a la producción de biomasa radical al metro de profundidad, la avena produjo mayor biomasa, (5192 kg MS/ha) respecto de las demás especies, las cuales no evidenciaron diferencias significativas entre sí (promedio 3386 kg MS/ha). En consecuencia, la avena mantuvo una relación biomasa radical/biomasa aérea de 1.0 diferenciándose significativamente de las demás especies, las cuales presentaron un valor promedio de 0.5 sin observar diferencias significativas entre tratamientos. Estos resultados se corresponden con estudios previos que muestran que en los cultivos anuales, la mayor proporción de fotoasimilados es destinado a estructuras reproductivas, por lo cual, los valores de partición a raíz suelen ser similares o inferiores a 1 (Buyanovsky y Wagner, 1986; Oderiz et al., 2017).

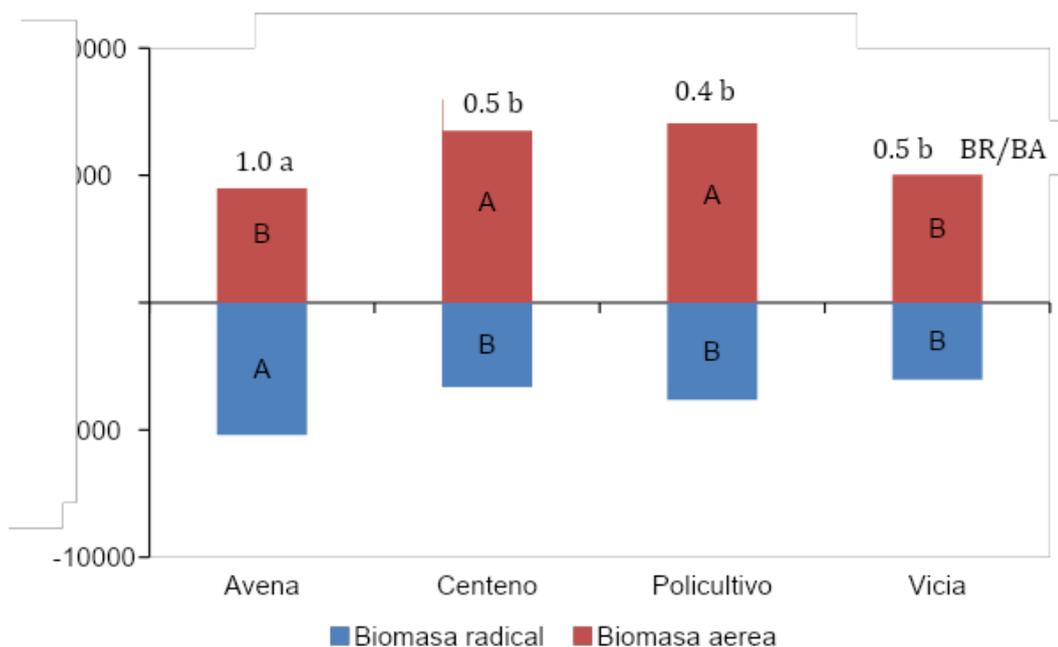


Figura 2: Biomasa aérea (BA), radical hasta el metro de profundidad (BR; kg MS/ha) y la relación raíz: parte aérea (BR/BA) al momento del secado de los cultivos de cobertura en el sitio F. Ameghino. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

En la Figura 3 se presentan los patrones de distribución de raíces de los diferentes cultivos de cobertura. La mayor abundancia de raíces se observó en los primeros 20 cm de suelo, donde los recursos son más abundantes, registrándose una drástica disminución por debajo de dicha profundidad. Similares resultados han sido observados en estudios previos (Oderiz et al., 2017). En cuanto al patrón de estratificación (cociente entre la biomasa de raíces a 0-20 cm y las raíces al metro en porcentaje) para los diferentes tratamientos a los 0-20 cm fueron 74, 75, 69, 55 y 49% para avena, centeno, policultivo, vicia y el testigo respectivamente. La producción de raíces en el primer estrato (0-20cm) para avena fue de 3851 kg MS/ha superior respecto de vicia 1660 kg MS/ha. En cambio el centeno y el policultivo presentaron valores intermedios similares a la avena de 2780 kg MS/ha y 2654 kg MS/ha respectivamente. Por el contrario, el remanente de raíces en el suelo luego de un largo barbecho (testigo) presentó una biomasa de raíces inferior de 401 kg MS/ha.

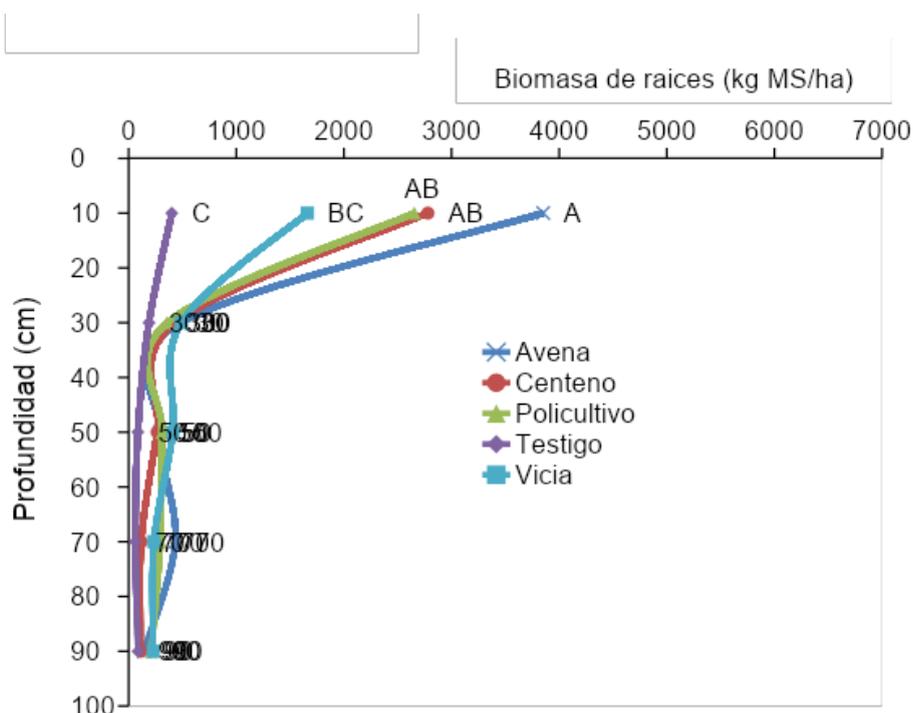


Figura 3: Patrón de distribución de raíces (kg MS/ha) al momento de secado de los cultivos de cobertura en el sitio F. Ameghino. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

La infiltración acumulada varió entre 24 y 120 mm, comprobándose diferencias significativas entre tratamientos después de 60 minutos de evaluación (Figura 4). El menor valor

se registró en el tratamiento sin cultivo de cobertura, mientras que el mayor valor de infiltración acumulada se observó en el tratamiento con avena. No se detectaron diferencias significativas entre los demás tratamientos siendo el promedio de 59 mm. En promedio los tratamientos con cultivos de cobertura mostraron una mejora en la infiltración acumulada en promedio del 146% respecto del tratamiento sin cultivo de cobertura (testigo). Con un índice de materia orgánica alto (IMO de 7) se esperaría tener un mejor comportamiento en cuanto al ingreso del agua del tratamiento testigo, hecho que no se comprueba en este sitio, y el cual daría lugar a un estudio más detallado donde se analicen otras propiedades físicas tendientes a validar el comportamiento del sitio.

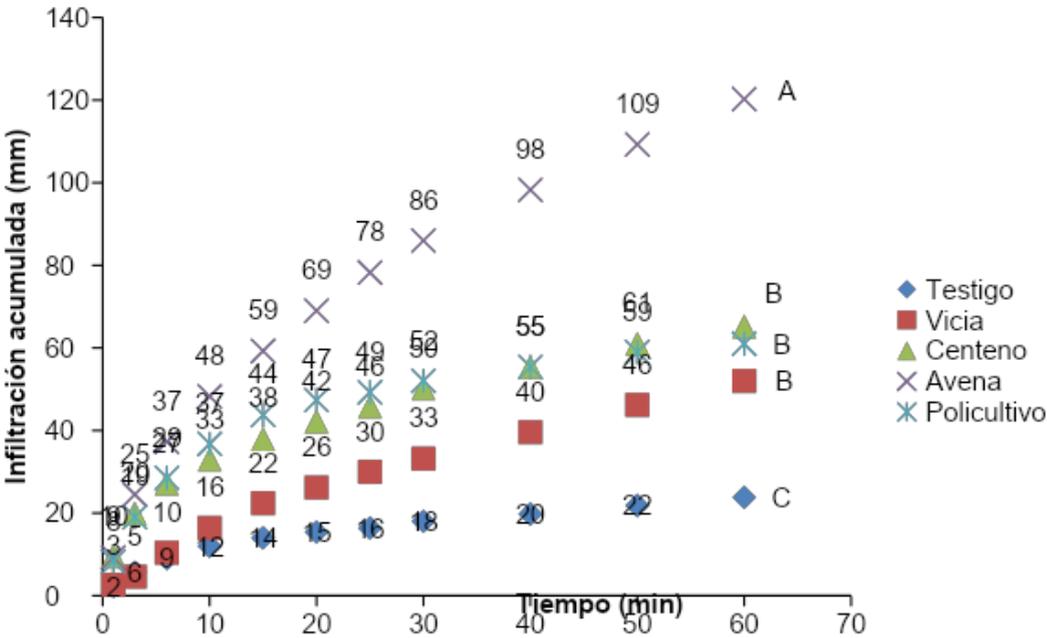


Figura 4: Infiltración acumulada (mm) al finalizar el ciclo de los cultivos de cobertura en el sitio F. Ameghino. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

La eficiencia de uso de agua (EUA) es la biomasa presente en un cultivo por unidad de agua utilizada por el mismo. En este sitio, el policultivo presentó una mayor EUA total (aérea + raíz) con un valor promedio de 47 kg MS/ha.mm respecto del resto de los tratamientos, los cuales presentaron similares valores entre sí (33 kg MS/ha.mm) (Figura 5). Además en el policultivo, la EUA aérea fue superior respecto del resto de los tratamientos indicando una mayor

inversión del agua consumida a la producción de biomasa aérea. Si bien no se encontraron diferencias significativas en la EUA total para el resto de los tratamientos, la avena fue la especie más eficiente en el uso del agua destinado a la producción radical con 16.3 kg MS/ha.mm.

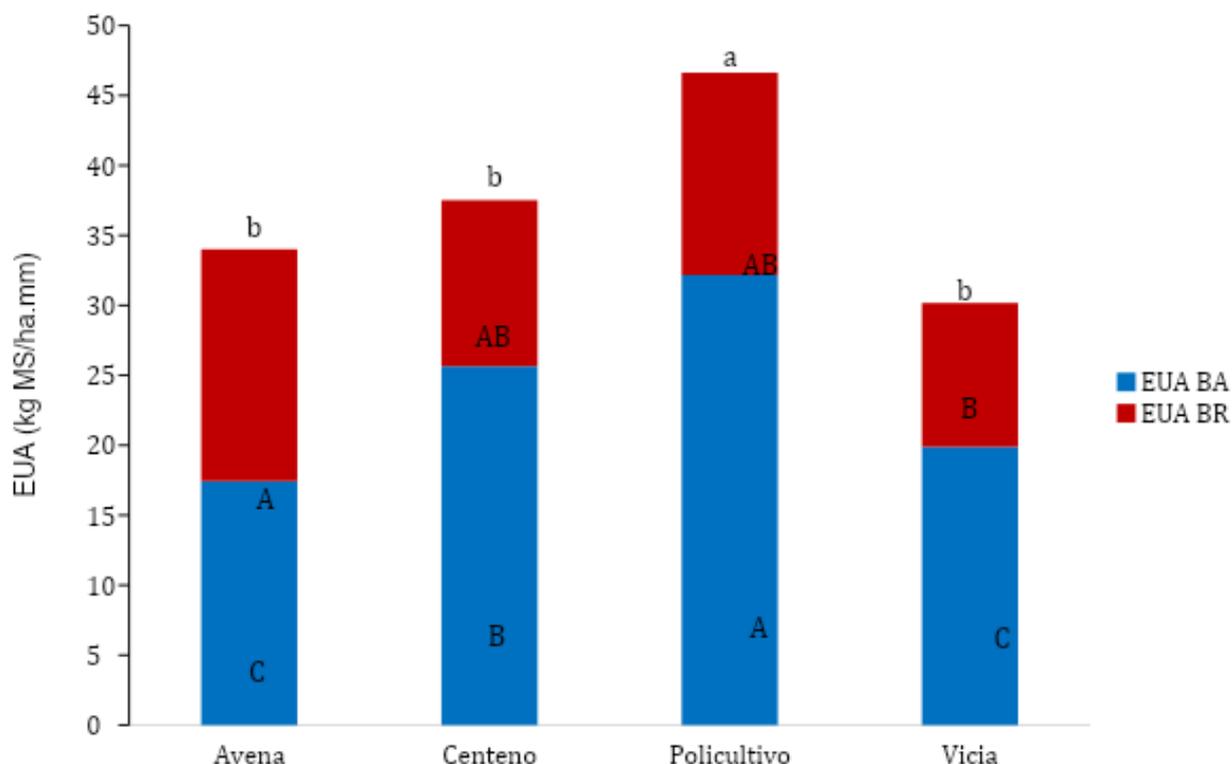


Figura 5: Eficiencia del uso del agua (kg MS/ha.mm) particionada en biomasa aérea (EUA BA) y biomasa radical (EUA BR) para los distintos tratamientos con cultivos de cobertura en el sitio F. Ameghino. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos para las variables EUA BA, EUA BR (mayúsculas) y EUA total (aérea + radical, minúsculas) ($p < 0.05$).

Sitio Pellegrini

En este sitio el suelo fue clasificado como Haplustol éntico, con un 32% de arcilla + limo, 1.9% materia orgánica total (IMO 5.9) y pH de 6.4 (Tabla 2). El régimen hídrico del sitio es ústico y las precipitaciones durante el ciclo de los cultivos de cobertura fueron de 222 mm partiendo de un contenido de agua inicial a la siembra de 205 mm. Es decir, una oferta de agua total de 427 mm. En la Figura 6 se presentan los valores medios de biomasa aérea y radical de los cultivos de cobertura establecidos en el sitio ubicado en la localidad de Pellegrini. La consociación vicia-centeno presentó los valores más altos de productividad aérea de 9843 kg MS/ha diferenciándose significativamente de los demás tratamientos. Avena, vicia y centeno

presentaron similares producciones de materia seca aérea entre sí, con un valor promedio de 7215 kg MS/ha. En cambio, el trébol persa fue el tratamiento con menor producción (1914 kg MS/ha). Por otra parte, la biomasa de raíces al metro de profundidad al final del ciclo de los cultivos de cobertura (BR) presentó diferencias significativas entre tratamientos. La consociación vicia-centeno produjo 8253 kg MS/ha de raíces, mientras que en los tratamientos monoespecie de centeno y vicia los valores fueron similares de 5845 kg MS/ha. Avena y trébol persa registraron los valores más bajos de 3569 y 2480 kg MS/ha respectivamente. Se encontraron diferencias significativas entre trébol persa (1.4) y el resto de los tratamientos (0,5-0.8).

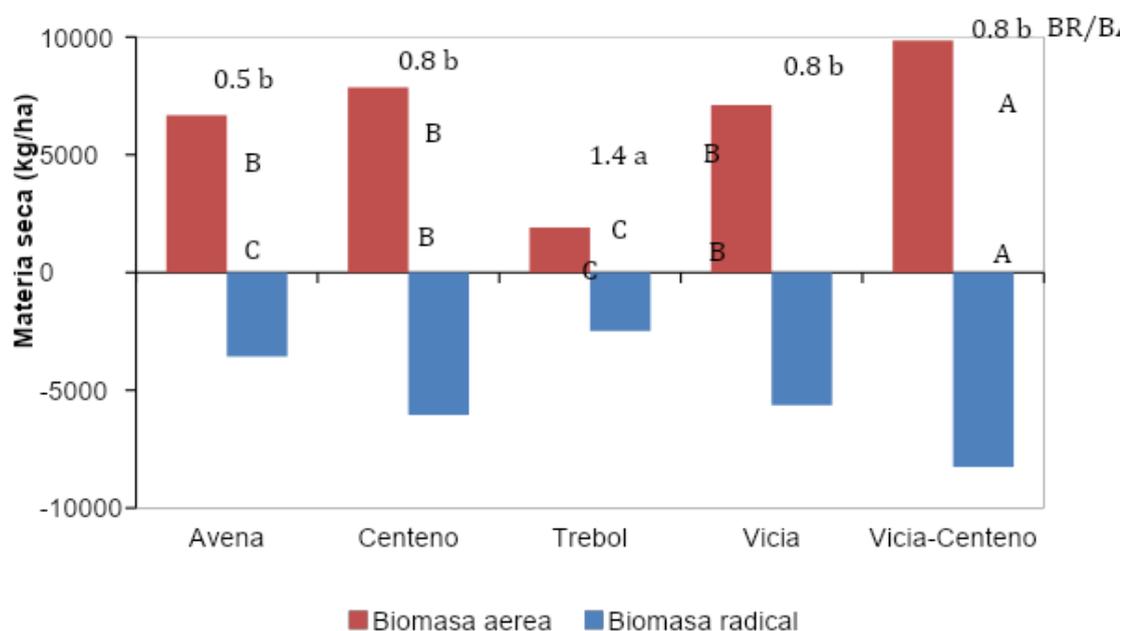


Figura 6: Biomasa aérea (BA), radical (BR) y la relación raíz: parte aérea (BR/BA) al momento del secado de los cultivos de cobertura en el sitio Pellegrini. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

En la Figura 7 se presentan la distribución de raíces de los diferentes cultivos de cobertura. El patrón de estratificación, entendido como el cociente entre la biomasa de raíces a 0-20 cm respecto del total de raíces al metro, fue del 74, 72, 71, 67, 58 y 50% para los tratamientos vicia-centeno, centeno, avena, trébol, vicia y el testigo respectivamente. La mayor estratificación de raíces en el estrato superior en las gramíneas estaría explicada por la arquitectura de su sistema radical de tipo cabellera, mientras que el aporte más balanceado en profundidad de las leguminosas estaría asociado a su sistema de tipo pivotante. Oderiz et al. (2017) también observaron una mayor estratificación de raíces de centeno en los primeros 20 cm

de suelo respecto de vicia con rangos de valores de 88-55 y 62-50% respectivamente según el tipo de suelo. Por otra parte, el tratamiento vicia-centeno presentó la mayor abundancia de raíces en los primeros 20 cm del perfil con un valor promedio de 6102 kg MS/ha, superando la biomasa radical de las respectivas monoespecies (4383 kg MS/ha centeno y 3272 kg MS/ha vicia), es decir que la combinación de ambas especies resultó beneficiosa en términos de su aporte de raíces. Los tratamientos de avena y trébol presentaron valores inferiores respecto del resto de los tratamientos con 2525 y 1660 kg MS/ha respectivamente mientras que el tratamiento sin CC (Testigo) resultó en 665 kg MS/ha. En el estrato de 20-40 cm, los tratamientos vicia y vicia-centeno presentaron mayor biomasa de raíces que el resto, mientras que en el estrato de 40-60 cm, el centeno y los tratamientos vicia, vicia-centeno y centeno, superaron en magnitud al resto.

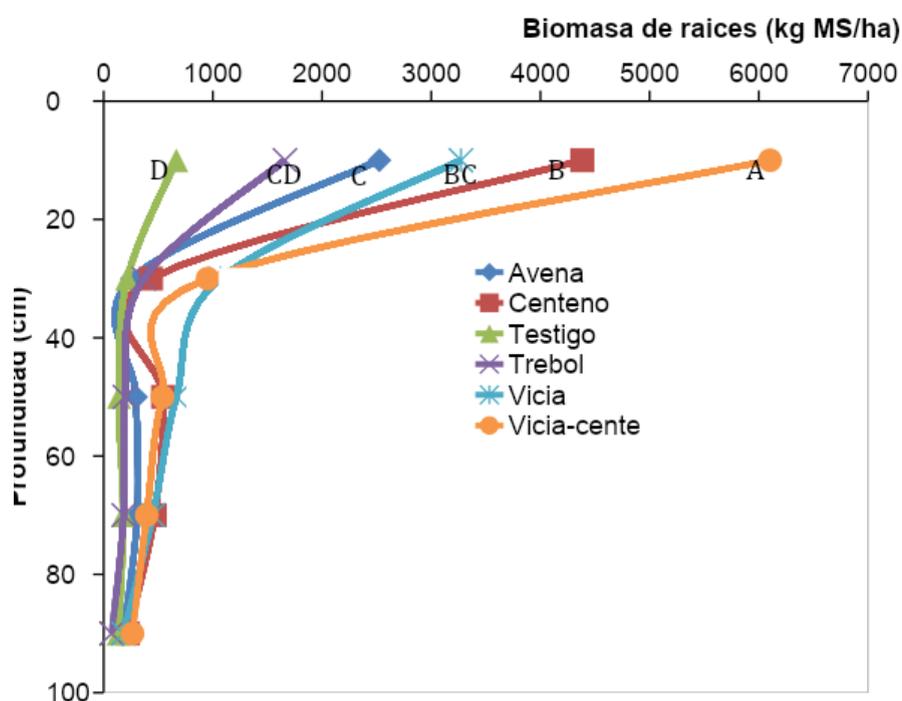


Figura 7: Patrón de distribución de raíces (kg MS/ha) al momento de secado de los cultivos de cobertura en el sitio Pellegrini. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

La infiltración acumulada evidenció diferencias entre tratamientos según se indica en la Figura 8. Los mayores valores se registraron para los tratamientos vicia-centeno (160 mm), centeno (157 mm), avena (129 mm) y vicia (124 mm) sin observar diferencias significativas entre sí. Por el contrario, la infiltración más baja se registró en los tratamientos testigo y trébol persa con magnitudes de 76 y 65 mm. En promedio los tratamientos con cultivos de cobertura

mostraron una mejora en la infiltración acumulada del 52% respecto del tratamiento sin cultivo de cobertura (testigo).

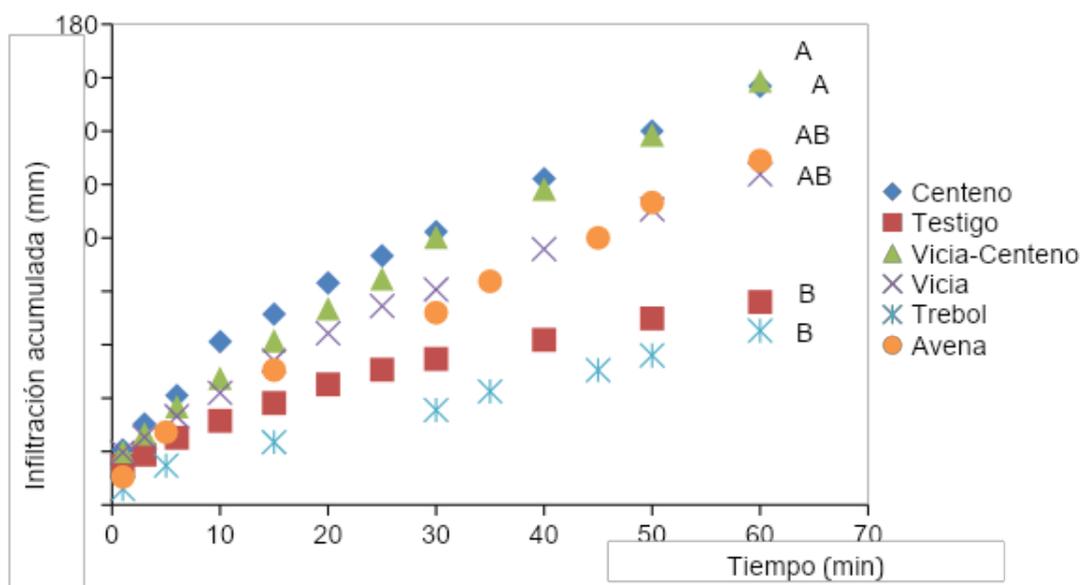


Figura 8: Infiltración acumulada (mm) al finalizar el ciclo de los cultivos de cobertura en el sitio Pellegrini. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Al analizar las eficiencias en el uso del agua total (aérea+raíces) que se presentan en la Figura 9 se puede observar que la consociación vicia-centeno fue el tratamiento con mayor eficiencia en el uso del agua total superando al resto de las monoespecies. Estos resultados sugieren un efecto sinérgico al combinar ambas especies, centeno y vicia, en este sitio con 61 kg MS/ha.mm. Por el contrario, las eficiencias fueron muy bajas en el trébol persa (15 kg MS/ha.mm). La EUA BA, la mezcla vicia-centeno (33 kg MS/ha.mm) se diferenció de los demás tratamientos, no habiendo diferencias entre centeno, avena y vicia (23 kg MS/ha.mm). El menor valor tanto para EUA de la biomasa aérea como raíz fue para trébol persa (6 y 8 kg MS/ha.mm). Con alta eficiencia en el uso del recurso agua, para la producción radicular como área la mezcla vicia-centeno nuevamente se diferenció de los demás tratamientos (28 kg MS/ha.mm), en segundo lugar centeno (20 kg MS/ha.mm), y con similares eficiencia de usos del agua vicia y avena (14 kg MS/ha.mm).

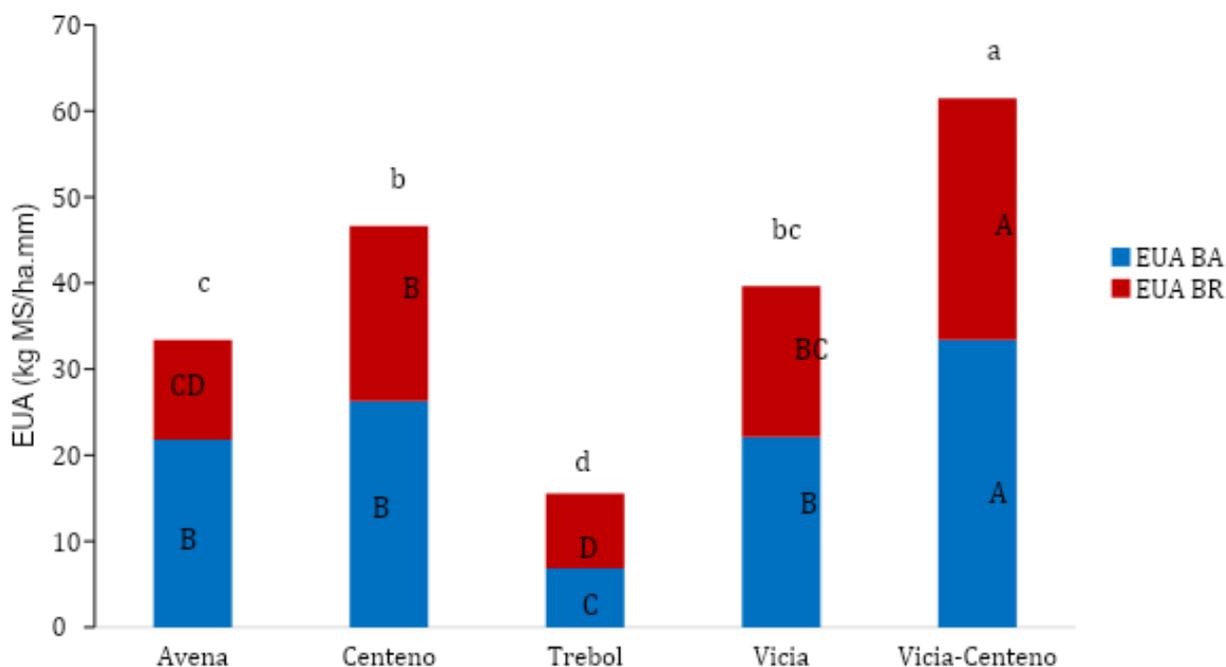


Figura 9: Eficiencia del uso del agua (kg MS/ha.mm) particionada en biomasa aérea (EUA BA) y biomasa radicular (EUA BR) para los distintos cultivos de cobertura en el Pellegrini. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos para las variables EUA BA, EUA BR (mayúsculas) y EUA total (aérea + radical, minúsculas) ($p < 0.05$).

Sítio B. Larroude

El tipo de suelo de este sitio fue clasificado como un Hapludol típico, con 35 % de limo + arcilla, 1.65% de materia orgánica y un IMO de 4.7 (Tabla 2). El régimen hídrico es údico y las precipitaciones durante el ciclo de los cultivos de cobertura fueron de 250 mm las cuales se sumaron a un contenido de agua inicial en el perfil de 153 mm, dando una oferta total de agua para los cultivos de 403 mm.

La producción de materia seca aérea total en el momento que se secaron los cultivos resultó de 6953 kg MS/ha en centeno, 6497 kg MS/ha para el policultivo y 5246 kg MS/ha en vicia, sin diferencias significativas entre tratamientos. En cuanto a la biomasa radical analizadas al metro de profundidad, el policultivo produjo 5099 kg MS/ha, centeno 4685 kg MS/ha. Los valores medios no permitieron registrar diferencias significativas entre estos, pero si hubo

diferencias con respecto a la vicia que registro 3072 kg MS/ha. En cuanto a la relación biomasa radical/ biomasa aérea no se registraron diferencias significativas entre los tratamientos, con valores de 0.77 para el policultivo, 0.67 en centeno y 0.60 en vicia (Figura 10).

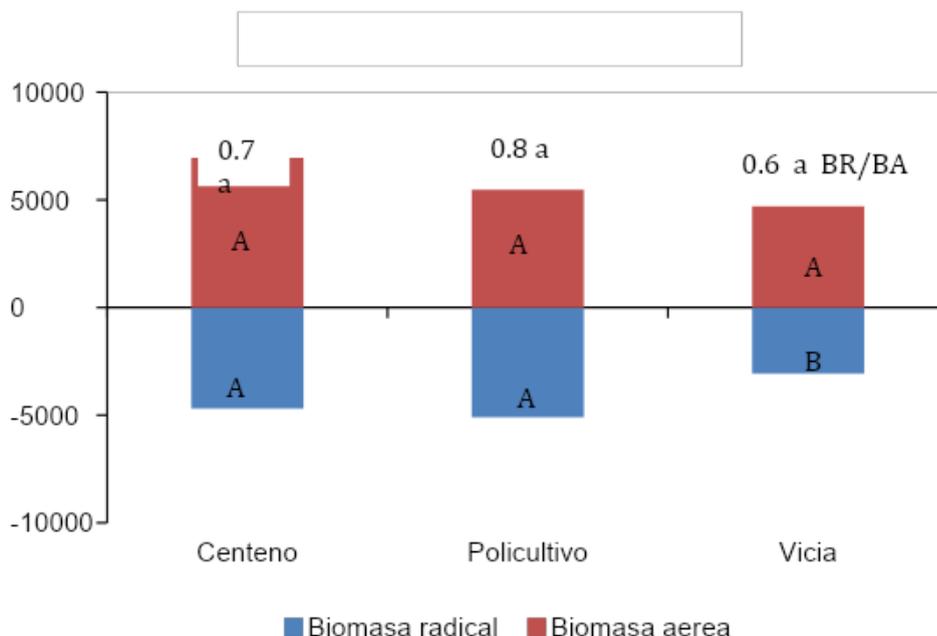


Figura 10: Biomasa aérea (BA), radical (BR) y la relación raíz: parte aérea (BR/BA) al momento del secado de los cultivos de cobertura en el sitio B. Larroude. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

La Figura 11 muestra la distribución de las raíces hasta el metro de profundidad de suelo. Las principales diferencias entre tratamientos se observan en el estrato superior donde se registró el 84, 77 y 67% de las raíces totales producidas en el policultivo, centeno y vicia respectivamente. En orden de magnitud, el policultivo presentó la mayor biomasa radical con 4287 kg MS/ha, seguido del centeno con 3596 kg MS/ha, la vicia con 2050 kg MS/ha y el testigo con 154 kg MS/ha en los primeros 0-20 cm de profundidad. En los estratos inferiores no se observaron diferencias significativas entre tratamientos.

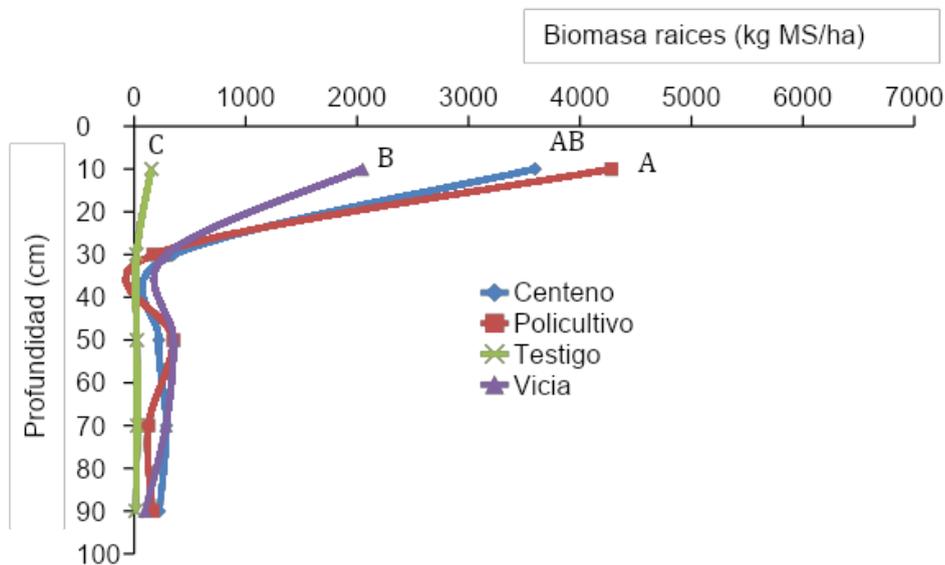


Figura 11: Patrón de distribución de raíces (kg MS/ha) al momento de secado de los cultivos de cobertura en el sitio B. Larroude. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

La infiltración acumulada no mostró diferencias significativas entre los tratamientos vicia y centeno arrojando valores de 107 y 86 mm respectivamente. En cuanto a los demás tratamientos se encontraron diferencias significativas, con valores para policultivo de 81 mm y para el testigo de 47 mm (Figura 12). En general los tratamientos con cultivos de cobertura mostraron una mejora en la infiltración acumulada en promedio del 95% respecto del tratamiento sin cultivo de cobertura (testigo).

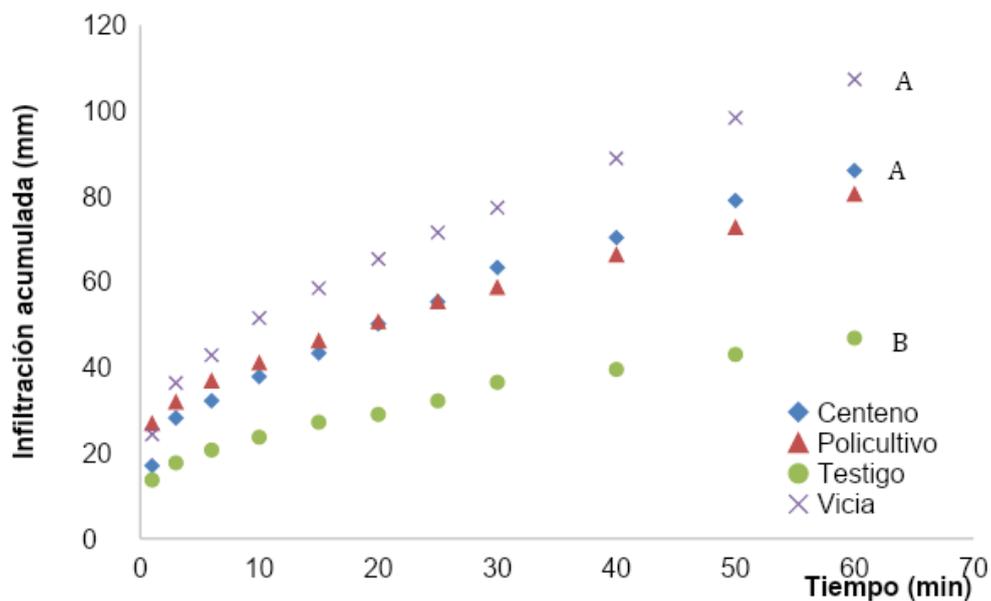


Figura 12: Infiltración acumulada (mm) al finalizar el ciclo de los cultivos de cobertura en el sitio B. Larroude. *Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).*

En cuanto a la eficiencia de uso de agua (EUA) el cultivo que presentó mayor EUA total (aérea + radical) fue el centeno arrojando valores de 44 kg MS/ha.mm distribuidos en 18 kg MS/ha.mm en raíz y 27 kg MS/ha.mm para la parte aérea (Figura 13). En cambio el policultivo presentó valores intermedios con una EUA total (aérea + radical) de 39 kg MS/ha.mm divididos entre parte aérea 22 kg MS/ha.mm y radical de 17 kg MS/ha.mm. Los valores más bajos se observaron en vicia con una EUA total de 30 kg MS/ha.mm compuesta por 19 y 11 kg MS/ha.mm para la parte aérea y radical respectivamente. En cuanto a la EUA BR vicia y policultivo no presentaron diferencias significativas entre ellos pero sí con respecto al centeno.

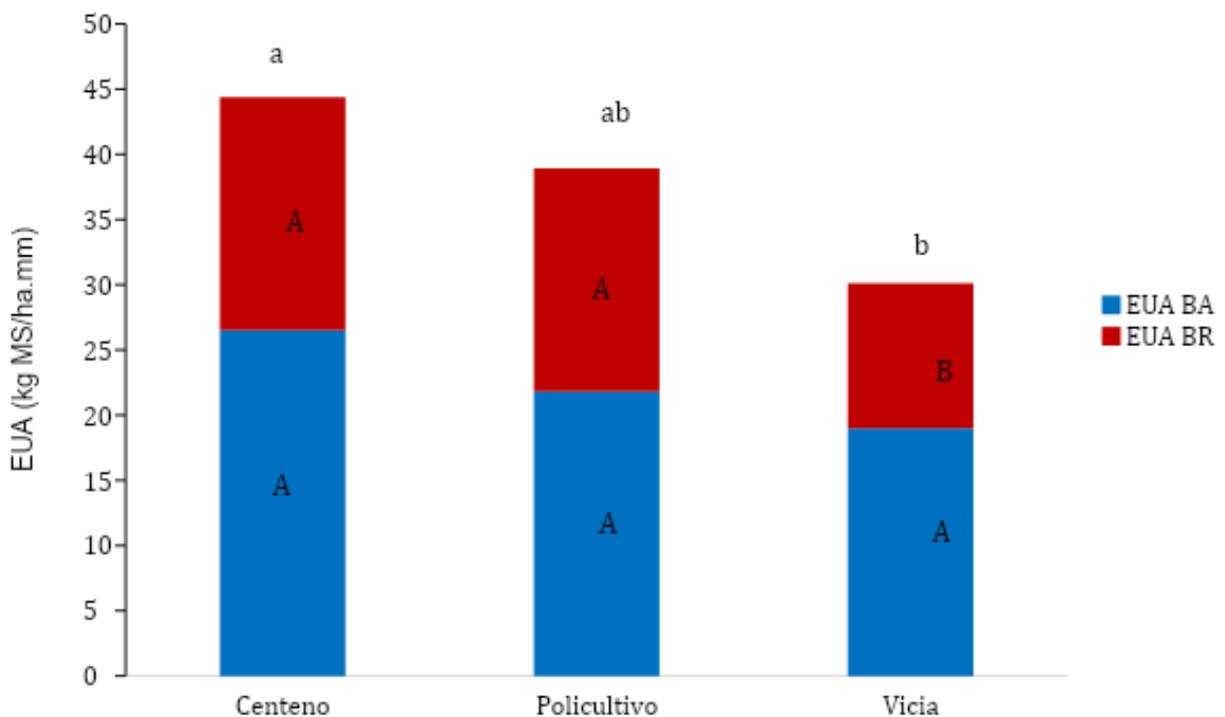


Figura 13: Eficiencia del uso del agua (kg MS/ha.mm) particionada en biomasa aérea (EUA BA) y biomasa radicular (EUA BR) para los distintos cultivos de cobertura en el sitio B. Larroude. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos para las variables EUA BA, EUA BR (mayúsculas) y EUA total (aérea + radical, minúsculas) ($p < 0.05$).

Sitio 30 de Agosto

Este sitio presenta un suelo clasificado como Hapludol típico con 40% de limo + arcilla, 2.5% de materia orgánica (IMO de 6.3). El sitio tiene un régimen hídrico údico, en el cual durante el ciclo de los cultivos las precipitaciones fueron de 287mm, con 246 mm de agua almacenados a la siembra.

La producción de materia seca aérea de los cultivos a fin de ciclo después de secados fueron de 8123 kg MS/ha para el cultivo de vicia-centeno, 4060 kg MS/ha para la vicia y 1952 kg MS/ha para el trébol, estadísticamente no presentaron diferencias significativas entre los cultivos de vicia y trébol pero si con respecto a la mezcla de vicia-centeno (Figura 14). En cuanto a la

biomasa radical los valores obtenidos fueron de 7073 kg MS/ha para vicia-centeno, 4593 kg MS/ha para vicia y 2556 kg MS/ha para trébol. Al igual que la biomasa aérea, la biomasa radical no presentó diferencias significativas entre trébol y vicia pero si con respecto a la mezcla vicia-centeno. Por otro lado la relación biomasa radical/aérea no presento diferencias significativas entre los diferentes tratamientos, observándose una relación de 1.30 para trébol, 1.20 para vicia y 0.87 para vicia-centeno.

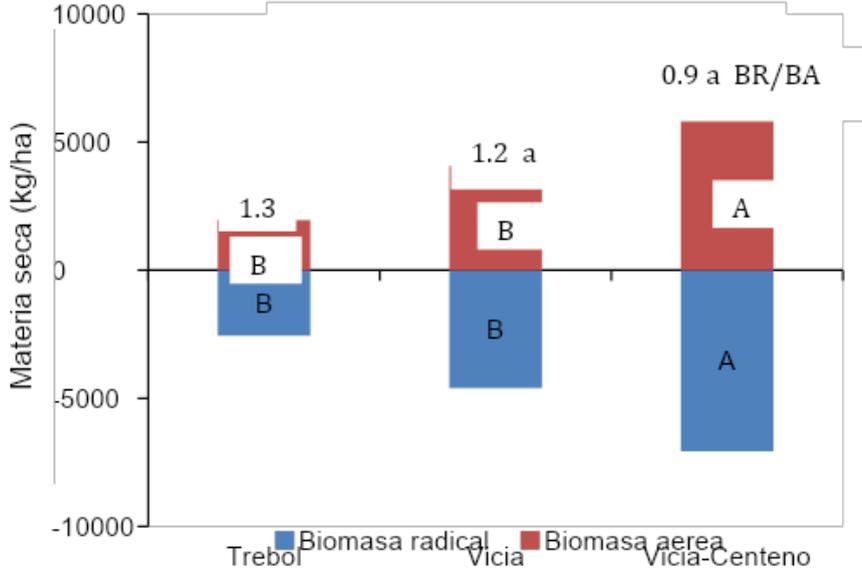


Figura 14: Biomasa aérea (BA), radical (BR) y la relación raíz: parte aérea (BR/BA) al momento del secado de los cultivos de cobertura en el sitio 30 de Agosto. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

En la Figura 15 se presenta el patrón de distribución de raíces en el suelo de los distintos cultivos de cobertura. En el estrato superficial las diferencias significativas se encontraron entre vicia-centeno con mayores valores, luego le siguió vicia y trébol sin mostrar diferencias entre si y por último el tratamiento testigo. Los valores de biomasa radical más altos se registraron en los primeros 20 cm de suelo, donde vicia-centeno presento (5321 kg MS/ha), seguidos de vicia y trébol con 2678 kg MS/ha y 1677 kg MS/ha respectivamente. En este sitio también se observó una importante estratificación de raíces en el estrato superior del 75, 66 y 58% para vicia-centeno, trébol y vicia respectivamente. El tratamiento testigo presentó valores muy bajos de raíces remanentes del cultivo antecesor (210 kg MS/ha) como consecuencia de la

descomposición de las mismas durante el periodo de barbecho. Por otra parte, todos los cultivos de cobertura vicia y vicia-centeno aportaron mayor biomasa de raíces en profundidad respecto del testigo.

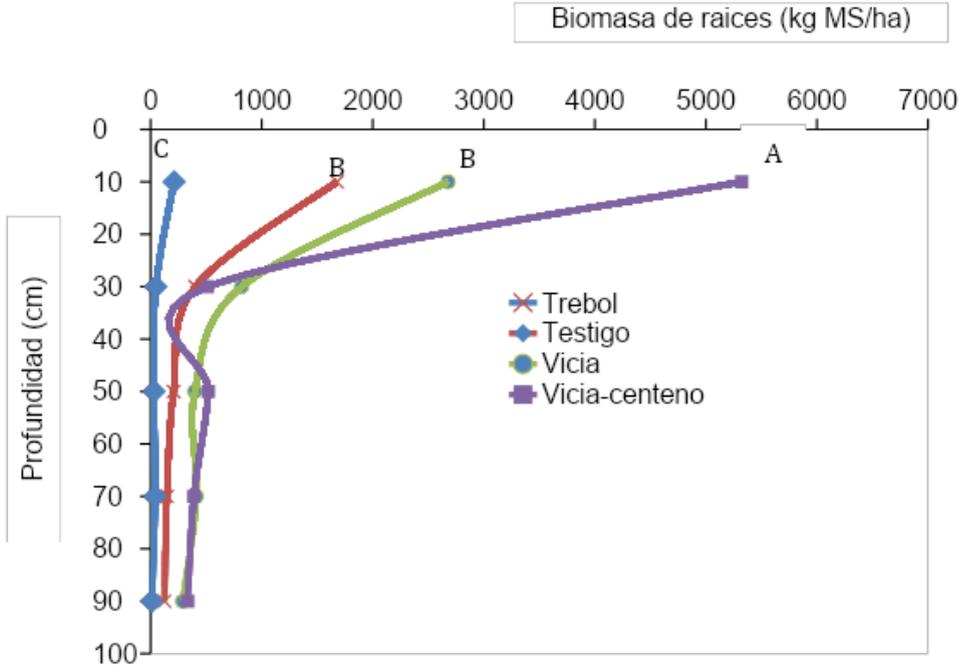


Figura 15: Patrón de distribución de raíces (kg MS/ha) al momento de secado de los cultivos de cobertura en el sitio 30 de Agosto. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

La infiltración acumulada no presentó diferencias significativas entre los tratamientos testigo, vicia y vicia-centeno, pero si con el cultivo de trébol. El trébol tuvo la mayor infiltración acumulada con valores de 188 mm, seguido por la vicia (101 mm), el testigo (94 mm) y vicia-centeno (85 mm) (Figura 16).

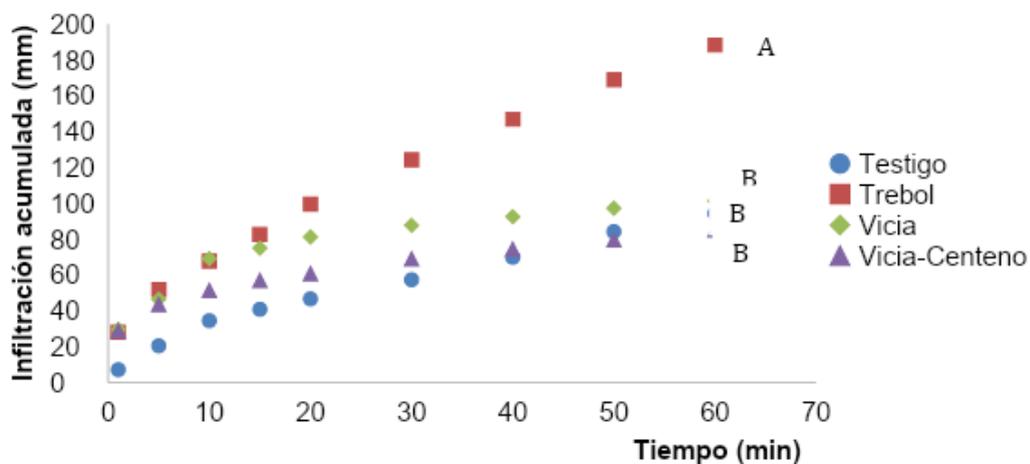


Figura 16: Infiltración acumulada (mm) al finalizar el ciclo de los cultivos de cobertura en el sitio 30 de Agosto. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

La mayor EUA total se alcanzó en el tratamiento vicia-centeno con valores de 36 kg MS/ha.mm, seguido por vicia con 20 kg MS/ha.mm y trébol con valores de 12 kg MS/ha.mm. La EUA para la producción de biomasa aérea presentó valores de 19 kg MS/ha.mm para vicia-centeno, 9 kg MS/ha.mm para vicia y 5 kg MS/ha.mm para trébol. Las diferencias en la EUA para la producción de biomasa radicular resultaron similares a las registradas en para la parte aérea, con valores de 17 kg MS/ha.mm para vicia-centeno, 11 kg MS/ha.mm para vicia y 7 kg MS/ha.mm para trébol (Figura 17).

Al analizar el comportamiento del trébol persa en los dos sitios donde fue utilizado como cultivo de cobertura (30 de agosto y Pellegrini), la especie mostró diferencias principalmente en la EUA para la producción de biomasa radical que podría estar explicada en parte por el régimen de humedad del suelo. El trébol persa es una especie que se adapta a suelos bajos, pesados y húmedos, con un rango de pH de 5,5-9, tolera las heladas intensas y alcanza sus máximos potenciales con niveles fosforo de 14 ppm (INIA, 2012). La EUA para la producción de raíces del trébol fue mayor en Pellegrini (régimen ústico) con una diferencia de 3 kg MS/ha.mm respecto al sitio de 30 de Agosto (régimen údico). Esta diferencia también se evidenció en la EUA para biomasa aérea aunque en menor magnitud. Estos resultados muestran que en suelos con un régimen de humedad limitado (ústico) el cultivo respondió con una mayor biomasa radical

asociado a una mayor exploración del suelo en busca del recurso limitante (Kudoyarova et al., 2015).

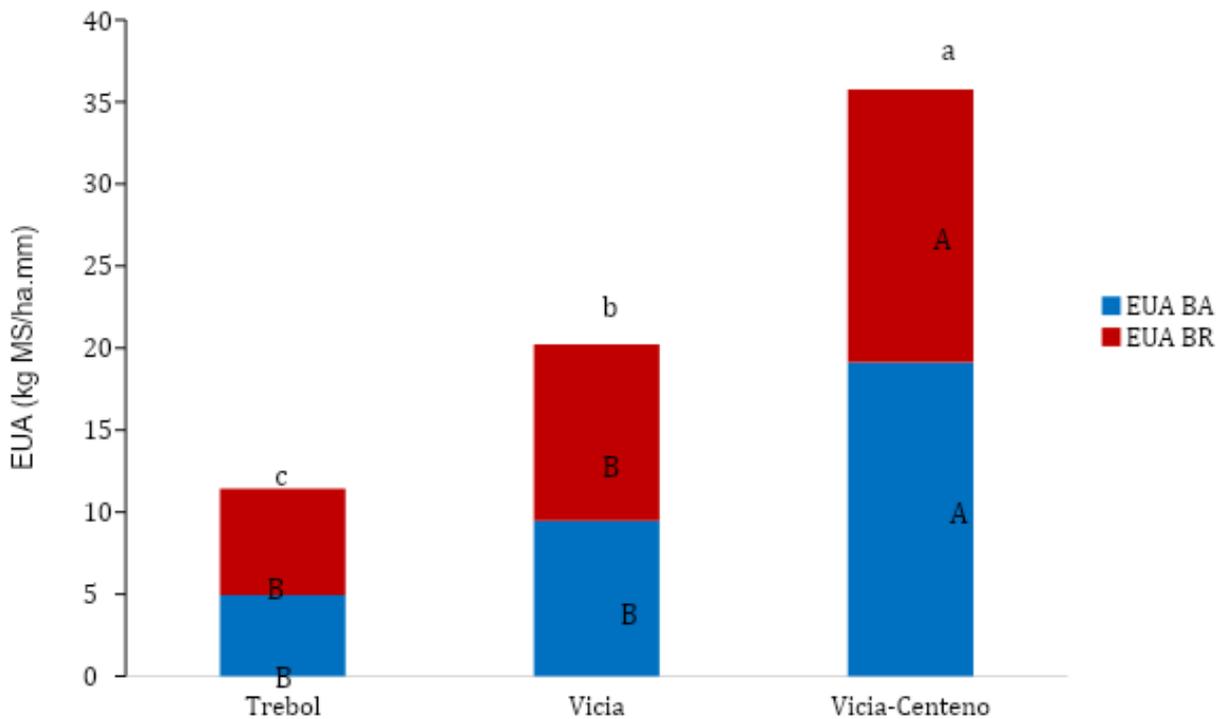


Figura 17: Eficiencia del uso del agua (kg MS/ha.mm) particionada en biomasa aérea (EUA BA) y biomasa radicular (EUA BR) para los distintos cultivos de cobertura en el sitio 30 de Agosto. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos para las variables EUA BA, EUA BR (mayúsculas) y EUA total (aérea + radical, minúsculas) ($p < 0.05$).

Sitio Santa Rosa

El suelo fue clasificado como Paleustol petrocálcico, con 52 % de arcilla + limo, 2.1% de materia orgánica (IMO de 4) y pH de 6.9. Este sitio tiene un régimen hídrico ústico, las precipitaciones registradas durante el ciclo de los cultivos de cobertura fueron de 95 mm, partiendo con un contenido inicial de agua a la siembra de 157 mm en el perfil del suelo.

Los resultados muestran que los tratamientos vicia-centeno y centeno como monoespecie registraron los mayores volúmenes de materia seca aérea con un valor promedio

de 2962 kg MS/ha. El tratamiento con vicia presentó una producción significativamente inferior (1293 kg MS/ha) al resto de los cultivos de cobertura. Similares valores de biomasa radical al metro de profundidad fueron observados para centeno y vicia-centeno (2435 y 2672 kg MS/ha respectivamente). No se observaron diferencias significativas en la relación BR/BA entre tratamientos (Figura 18)

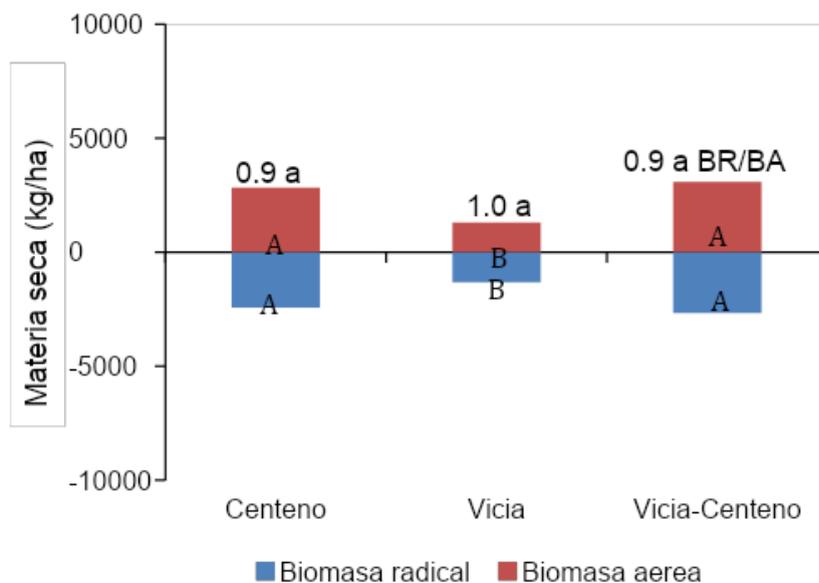


Figura 18: Biomasa aérea (BA), radical (BR) y la relación raíz: parte aérea (BR/BA) al momento del secado de los cultivos de cobertura en el sitio Santa Rosa (L.P.) Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

La distribución de raíces en el perfil del suelo se presenta en la Figura 19. De manera similar al resto de los sitios estudiados, el patrón de raíces de los tratamientos con cultivos de cobertura mostró una importante estratificación en los primeros 20 cm del perfil (63-74%). Se registraron valores de biomasa de raíces de 1934, 1535 y 974 kg MS/ha para los tratamientos vicia-centeno, centeno y vicia respectivamente. Por el contrario, el testigo presentó valores mínimos de biomasa de raíces a lo largo de todo el perfil. En los estratos inferiores, todos los tratamientos con cultivos de cobertura superaron al testigo y las diferencias fueron más evidentes en el estrato de 20-60 cm.

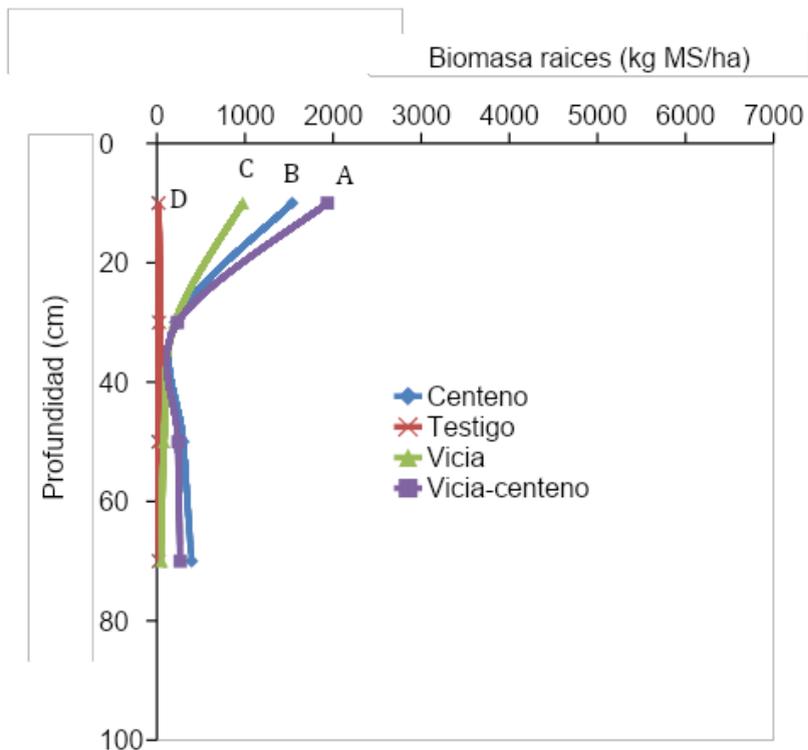


Figura 19: Patrón de distribución de raíces (kg MS/ha) al momento de secado de los cultivos de cobertura en el sitio Santa Rosa (L.P.). Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

La infiltración acumulada varió entre 110 y 340 mm (Figura 20). En general los tratamientos con cultivos de cobertura mostraron una mejora en la infiltración acumulada del 173% respecto del tratamiento sin cultivo de cobertura (testigo). Sin embargo, para este sitio no se observaron diferencias significativas entre tratamientos con cultivos de cobertura, registrándose un valor promedio de 295 mm.

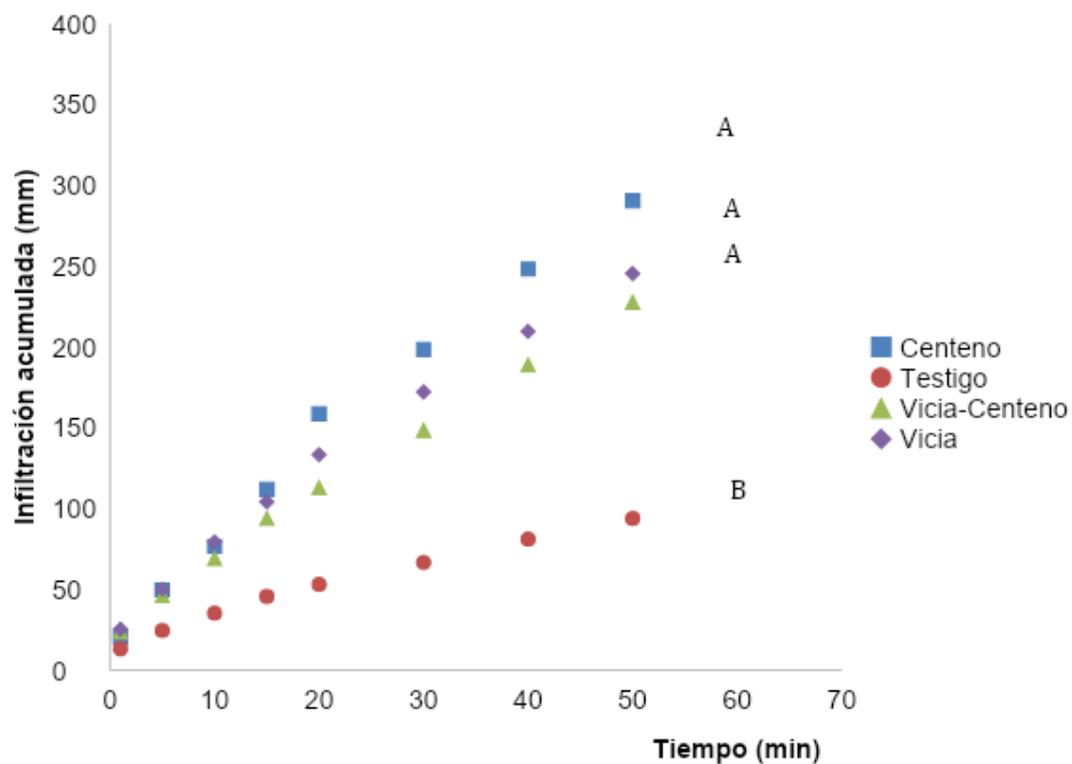


Figura 20: efecto de la inclusión de especies utilizadas como cultivo de cobertura (CC) sobre la infiltración acumulada. *Las letras indican diferencias entre tratamientos para cada cultivo ($p < 0.05$).*

Por otra parte, los tratamientos vicia-centeno y centeno presentaron EUA total similares entre sí (38 kg MS/ha.mm) y superiores al tratamiento con vicia (22 kg MS/ha.mm) (Figura 21). Similares diferencias entre tratamientos se observaron en las EUA para la producción de biomasa aérea y radical.

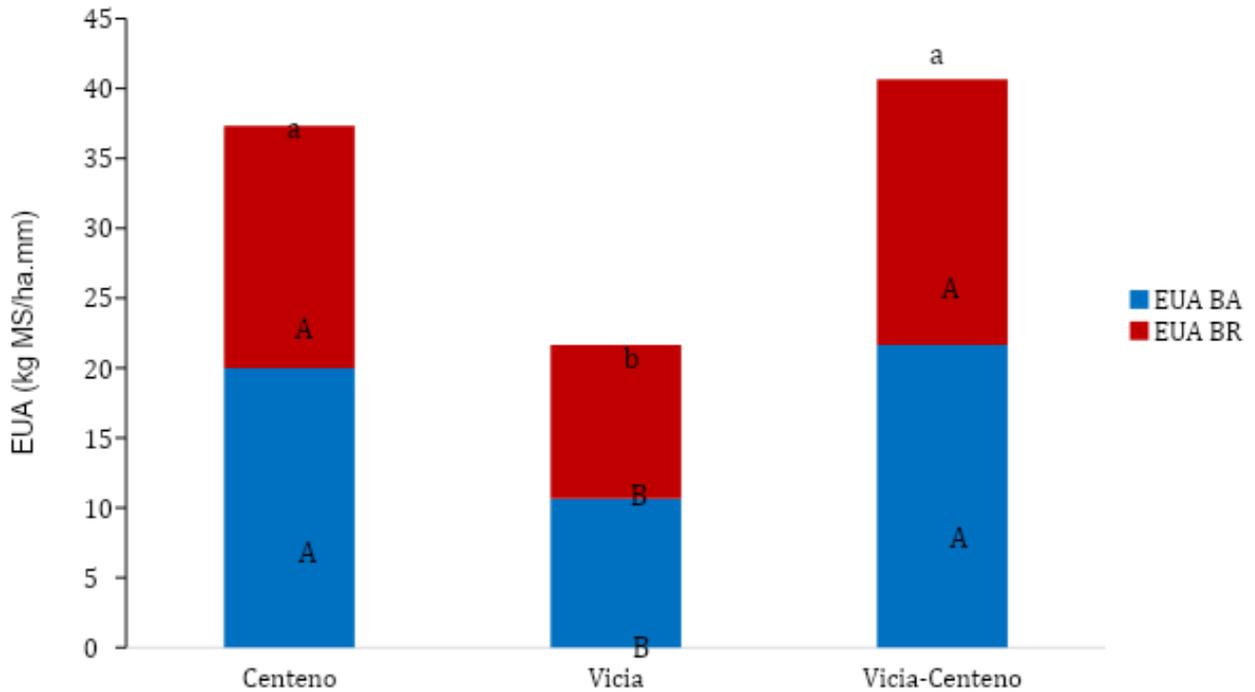


Figura 21: Eficiencia del uso del agua (kg MS/ha.mm) particionada en biomasa aérea (EUA BA) y biomasa radicular (EUA BR) para los distintos cultivos de cobertura en Santa Rosa (L.P.). Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos para las variables EUA BA, EUA BR (mayúsculas) y EUA total (aérea + radical, minúsculas) ($p < 0.05$).

Relaciones entre las variables

Los resultados mostraron una relación lineal y positiva entre la eficiencia de uso del agua para la producción de biomasa aérea de los cultivos de cobertura y su biomasa radicular hasta el metro de profundidad en los sitios con régimen de humedad ústico (Figura 22). Por el contrario, en los sitios sin limitación por agua (régimen údico) no se pudo comprobar relación entre ambas variables. Cuando el agua es un recurso escaso, la respuesta generalmente observada es un incremento en el crecimiento de la raíz en busca de dicho recurso limitante (Kudoyarova et al., 2015). Además, las eficiencias en el uso del agua total (aérea y radicular) resultaron ser superiores cuando se utilizó la gramínea como cultivo de cobertura como se evidencio en todos los sitios bajo estudio. La consociación vicia-centeno tuvo un efecto sinérgico mejorando aún más la EUA, mientras que utilizar más de dos especies no necesariamente mejoró dicha eficiencia aunque los policultivos solo fueron evaluados en dos de los sitios de estudio. Esto

señala la necesidad de profundizar el estudio de las posibles combinaciones de arquitecturas de canopeo y raíces para disminuir la competencia y favorecer la sinergia entre especies. Dentro de las especies leguminosas evaluadas, la vicia mostro eficiencias de uso superiores al trébol persa (Pellegrini y 30 de Agosto), mientras que en el caso de las gramíneas, el centeno fue más eficiente que la avena en los sitios estudiados.

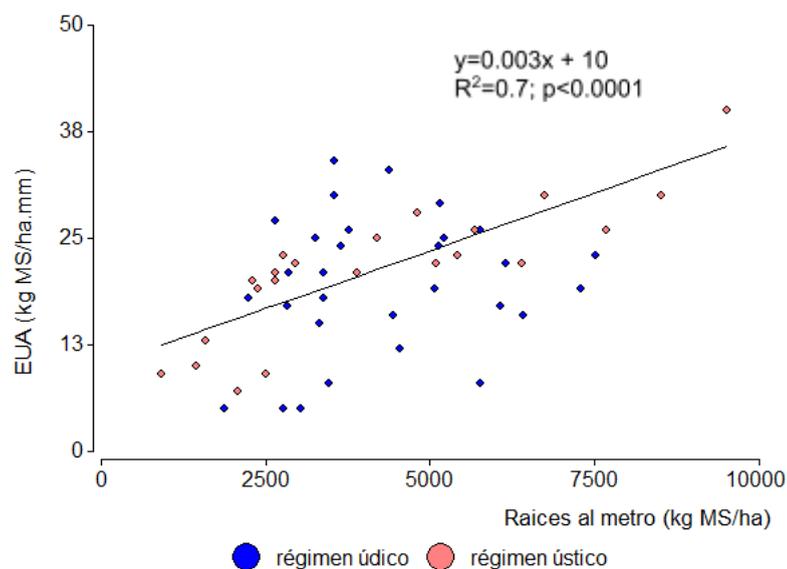


Figura 22: Relación entre la eficiencia de uso de agua de la biomasa aérea (kg MS/ha.mm) y la biomasa de raíces totales hasta el metro de profundidad (kg MS/ha) en los diferentes sitios de estudio clasificados según el régimen de humedad del suelo.

Las raíces también contribuyen con la formación de nuevos poros en el suelo, mejorando el ingreso del agua de lluvia (Hamblin, 1986; Dexter, 1987). Los resultados de esta experiencia muestran una relación lineal y positiva entre la infiltración acumulada y la abundancia de raíces en los primeros 20 cm de suelo como consecuencia de la inclusión de los cultivos de cobertura (Figura 23). Sin embargo, dicha relación estuvo condicionada por la calidad de sitio. Santa Rosa y Pellegrini evidenciaron mejores respuestas en la infiltración de agua por mayores aportes de raíces de los cultivos de cobertura, ambos sitios bajo régimen de humedad ústico. En el sitio Santa Rosa, con una textura de suelo más fina y una condición física degradada indicada por el valor de IMO inferior a 5, los incrementos en la infiltración fueron superiores a los otros sitios (pendiente) aun con un rango de valores de biomasa radical acotado respecto a los observados en los sitios de texturas más gruesas. Esta baja abundancia de raíces de los cultivos de cobertura en el estrato de 0-20 cm podría estar explicada por una mayor resistencia a la penetración en el suelo de textura más fina y baja macroporosidad (Bengough et al., 2011). En

cambio, en los otros sitios sin evidencia de degradación física (IMO>5) los incrementos en la infiltración en respuesta a mayores valores de biomasa radical fueron más atenuados. El único sitio donde no se encontró una relación significativa entre las variables fue 30 de Agosto.

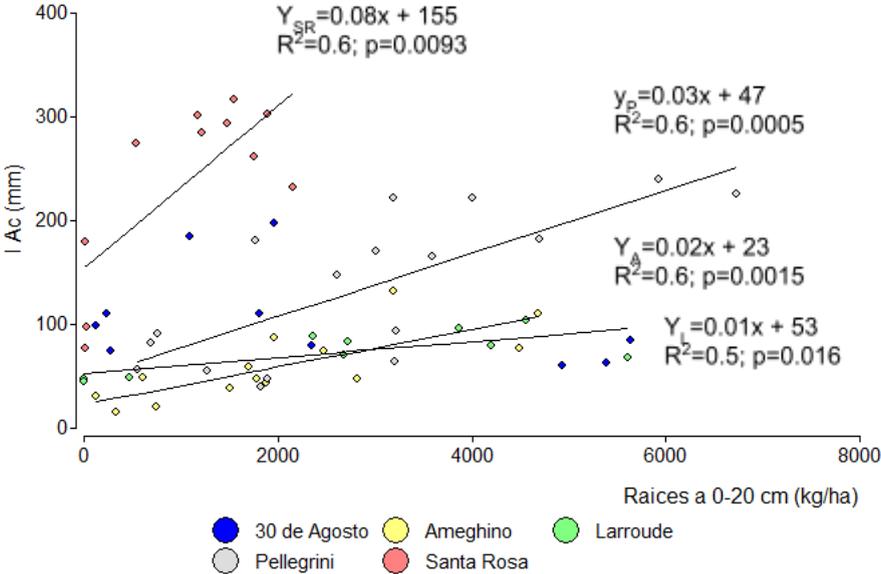


Figura 23: Relación entre la infiltración acumulada (mm) y la biomasa radical en los primeros 20 cm del perfil de suelo (kg MS/ha) para los diferentes sitios de estudio.

Por otra parte, no se encontró una única especie “cuyos efectos resulten superiores al resto” en cuanto a mejorar la captación de agua. Si bien las gramíneas utilizadas como cultivo de cobertura se caracterizan por producir un sistema radicular denso en cabellera que contribuiría con una mejora en la macroporosidad del suelo (Bodner et al., 2014), no se observó una diferencia marcada entre utilizar gramíneas o leguminosas (Tabla 3). Tampoco se observó que el uso de dos o más especies consociadas incrementa la infiltración respecto del uso de una especie. Sin embargo, en todos los sitios la inclusión de cultivos de cobertura incrementó los valores de infiltración (entre 33 y 173%) respecto de los testigos en los diferentes sitios de estudio.

Tabla 3: Tabla resumen de las diferencias en la infiltración acumulada registradas para cada tratamiento y sitio de estudio. La tercera columna corresponde al incremento porcentual en la infiltración acumulada del promedio de los tratamientos con cultivo de cobertura respecto del testigo (%).

Sitio	Diferencias entre tratamientos	Incremento respecto del testigo (%)
F. Ameghino	Av > C = Poli = V > T	146
Pellegrini	C = VC = Av = V > Tr = T	52
B. Larroude	V = C = Poli > T	95
30 de Agosto	Tr > V = VC = T	33
Santa Rosa	C = V = VC > T	173

Las abreviaciones corresponden a: avena (Av), centeno (C), vicia-centeno (VC), policultivo (Poli), vicia (V), trébol persa (Tr) y testigo (T).

CONSIDERACIONES FINALES

La especie utilizada como cultivo de cobertura y el régimen hídrico condicionaron la partición raíz: biomasa aérea, aspecto que fue evidente principalmente en las monoespecies vicia y centeno adoptadas en la mayoría de los sitios de estudio. Estas especies presentaron una mayor partición a raíz en los suelos con régimen ústico. Incrementos en la abundancia de raíces de los cultivos de cobertura se tradujeron en aumentos en la eficiencia de uso del agua en este régimen de humedad, y en general, las gramíneas fueron más eficientes que las leguminosas. Además, la consociación vicia-centeno tuvo un efecto sinérgico mejorando aún más dicha eficiencia respecto de las monoespecies. Si bien no se encontró una única especie que mejore la infiltración de agua al suelo o el uso de mezclas consociadas, mayores volúmenes de raíces producidas por los cultivos de cobertura tuvieron una respuesta positiva en el ingreso del agua al suelo, en todos los sitios estudiados.

BIBLIOGRAFIA

- Álvarez, C., Quiroga, A., Santos, D., Bodrero, M., 2013. Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción. INTA, Anguil.
- Alvarez, R., Steinbach, H.S., De Paepe, J.L., 2017. Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research* 170, 53–65.
- Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., Valentine, T.A., 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exp. Bot.* 62, 59–68.
- Blanco-Canqui, H., Lal, R., 2009. Crop Residue Removal Impacts on Soil Productivity and Environmental Quality. *Critical Reviews in Plant Sciences* 28, 139–163.
- Blesh, J., 2017. Functional traits in cover crop mixtures: Biological nitrogen fixation and multifunctionality. *Journal of Applied Ecology* 1–11.
- Blesh, J., 2017. Functional traits in cover crop mixtures: Biological nitrogen fixation and multifunctionality. *J. Appl. Ecol.* 1–11.
- Bodner, G., Leitner, D., Kaul, H.P., 2014. Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently. *Plant Soil* 380, 133–151.
- Bray, R.H., Kurtz, L.T., 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59, 39–46.
- Bremner, J.M., Jenkinson, D.S., 1960. Determination of organic carbon in soil: I. Oxidation dichromate of organic matter in soil and plant materials. *J. Soil Sci.* 11, 394–402.
- Dexter, A.R., 1987. Compression of soil around roots. *Plant Soil* 97, 401–406.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M., Robledo, C.W., 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Fernández, R., Quiroga, A., Noellemeyer, E., 2012. Cultivos de cobertura, ¿una alternativa viable para la región semirárida pampeana? *Ciencia Del Suelo* 30, 137–150.
- Finney, D.M., Kaye, J.P., 2017. Functional diversity in cover crop polycultures increases multifunctionality of an agricultural system. *Journal of Applied Ecology* 54, 509–517.
- Finney, D.M., Kaye, J.P., 2017. Functional diversity in cover crop polycultures increases multifunctionality of an agricultural system. *J. Appl. Ecol.* 54, 509–517.
- Frasier, I., Noellemeyer, E., Amiotti, N., Quiroga, A., 2017. Vetch-rye biculture is a sustainable alternative for enhanced nitrogen availability and low leaching losses in a no-till cover crop system. *Field Crops Research* 214, 104–112.
- Frasier, I., Noellemeyer, E., Amiotti, N., Quiroga, A., 2017. Vetch-rye biculture is a sustainable alternative for enhanced nitrogen availability and low leaching losses in a no-till cover crop system. *F. Crop. Res.* 214, 104–112.
- Frasier, I., Noellemeyer, E., Fernández, R., Quiroga, A., 2016. Direct field method for root biomass quantification in agroecosystems. *MethodsX* 3, 513–519.
- Frasier, I., Riestra, D., Noellemeyer, E., Quiroga, A.R., 2014. Aporte de C y N de raíces de cultivos de cobertura, in: Sa Pereira, E., Minoldo, G., Galantini, J.A. (Eds.), *Impacto de Los Sistemas Actuales de Cultivo Sobre Las Propiedades Químicas Del Suelo: Efectos Sobre Los*

Balances de Carbono. p. 196.

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

INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY). 2012. Bases del llamado a interesados para la producción y comercialización de semilla del cultivar de *Trifolium resupinatum* LE 90-33. (en línea). Montevideo. pp. 5-7. Disponible en http://www.inia.org.uy/estaciones/las_brujas/actividades/document

Kätterer, T., Bolinder, M.A., Andrén, O., Kirchmann, H., Menichetti, L., 2011. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141, 184–192.

Kong, A.Y.Y., Six, J., 2010. Tracing Root vs. Residue Carbon into Soils from Conventional and Alternative Cropping Systems. *Soil Science Society of America Journal* 74, 1201–1210.

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

López, M.V., Arrúe, J.L., 1997. Growth, yield and water use efficiency of winter barley in response to conservation tillage in a semi-arid region of Spain. *Soil and Tillage Research* 44, 35–54.

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

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

Quiroga, A., Funaro, D., Noellemeyer, E., Peinemann, N., 2006. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research* 90, 63–68.

Quiroga, A.R., Fernandez, R., Frasier, I., Scianca, C., 2009. CULTIVOS DE COBERTURA. Análisis de su inclusión en distintos sistemas de producción. Jornadas Nacionales “Sistemas Productivos Sustentables: Fósforo, Nitrógeno y Cultivos de Cobertura”. AACCS. 10 y 11 de agosto, Bahía Blanca.

Restovich, R., Andriulo, A., 2013. Cultivos de cobertura en la rotación con soja-maíz: biomasa aérea, captura de nitrógeno, consumo de agua y efecto sobre el rendimiento de grano, in: Alvarez, C., Quiroga, A., Santos, D., Bodrero, M. (Eds.), *Contribuciones de Los Cultivos de Cobertura a La Sostenibilidad de Los Sistemas de Producción*. Anguil, p. 195.

Sainju, U.M., Whitehead, W.F., Singh, B.P., 2005. Biculture Legume–Cereal Cover Crops for Enhanced Biomass Yield and Carbon and Nitrogen. *Agronomy Journal* 97, 1403–1412.

Sainju, U.M., Whitehead, W.F., Singh, B.P., 2005. Biculture Legume–Cereal Cover Crops for Enhanced Biomass Yield and Carbon and Nitrogen. *Agron. J.* 97, 1403–1412.

Schipanski, M.E., Barbercheck, M., Douglas, M.R., Finney, D.M., Haider, K., Kaye, J.P., Kemanian, A.R., Mortensen, D.A., Ryan, M.R., Tooker, J., White, C., 2014. A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. *Agricultural Systems* 125, 12–22.

Schipanski, M.E., Barbercheck, M., Douglas, M.R., Finney, D.M., Haider, K., Kaye, J.P., Kemanian, A.R., Mortensen, D.A., Ryan, M.R., Tooker, J., White, C., 2014. A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. *Agric. Syst.* 125, 12–22.

Smith, R.G., Atwood, L.W., Warren, N.D., 2014. Increased productivity of cover crop mixture is

not associated with enhanced agroecosystem services. *PLoS One* 9, e93751.

Smith, R.G., Atwood, L.W., Warren, N.D., 2014. Increased productivity of cover crop mixture is not associated with enhanced agroecosystem services. *PLoS One* 9, e93751.

Tosti, G., Benincasa, P., Farneselli, M., Pace, R., Tei, F., Guiducci, M., Thorup-Kristensen, K., 2012. Green manuring effect of pure and mixed barley - hairy vetch winter cover crops on maize and processing tomato N nutrition. *European Journal of Agronomy* 43, 136–146.

Tosti, G., Benincasa, P., Farneselli, M., Pace, R., Tei, F., Guiducci, M., Thorup-Kristensen, K., 2012. Green manuring effect of pure and mixed barley - hairy vetch winter cover crops on maize and processing tomato N nutrition. *Eur. J. Agron.* 43, 136–146.

White, C.M., DuPont, S.T., Hautau, M., Hartman, D., Finney, D.M., Bradley, B., LaChance, J.C., Kaye, J.P., 2017. Managing the trade off between nitrogen supply and retention with cover crop mixtures. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 237, 121–133.

White, C.M., DuPont, S.T., Hautau, M., Hartman, D., Finney, D.M., Bradley, B., LaChance, J.C., Kaye, J.P., 2017. Managing the trade off between nitrogen supply and retention with cover crop mixtures. *Agric. Ecosyst. Environ.* 237, 121–133.