



UTILIZACIÓN DE CULTIVOS DE COBERTURA EN MONOCULTIVO DE SOJA: EFECTOS SOBRE EL BALANCE HÍDRICO Y ORGÁNICO

MATÍAS EZEQUIEL DUVAL^{1*}; JULIA ESTER CAPURRO²; JUAN ALBERTO GALANTINI³ & JOSÉ MIGUEL ANDRIANI⁴

Recibido: 08-06-15

Recibido con revisiones: 21-07-15

Aceptado: 25-07-15

RESUMEN

Los cultivos de cobertura (CC) son una alternativa para mejorar la falta de cobertura y balance de carbono (C) en suelos bajo siembra directa con monocultivo de soja (*Glycine max* L. Merr.), predominantes en la Región Pampeana. En este estudio (2006-2011) se evaluó el efecto de especies otoño-invernales trigo (T), avena (A), vicia (V) y avena+via (A+V) como CC sobre el consumo de agua, cantidad de materia seca (MS) producida y contenidos de carbono orgánico del suelo (COT), utilizando un control (Ct) sin CC. La producción de biomasa de los CC estuvo relacionada con las precipitaciones registradas entre los meses de Junio y Octubre. En general, los tratamientos T y A aportaron mayor cantidad de MS al suelo, en promedio, la biomasa de estas gramíneas fue 24 y 91% superior en comparación con A+V y V. El costo hídrico de la inclusión de los CC fue de 13 a 93 mm en comparación con Ct. A la siembra del cultivo de soja, en general, Ct presentó los mayores contenidos hídricos. Sin embargo, este tratamiento presentó una pérdida de humedad por evaporación sin producción de biomasa, la cual fue utilizada por los CC para fijar entre 18 y 303 kg C ha⁻¹ mm⁻¹ dependiendo de las condiciones del año. La inclusión de T, A y A+V, aumentó el COT a una tasa de 597 a 98 kg C ha⁻¹ año⁻¹ en 0-25 cm, mientras que sin CC o utilizando leguminosas (V) disminuyó 824 y 289 kg C ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Para la conservación o aumento del COT en planteos de monocultivos de soja, el uso de A, A+V y T como CC serían una opción viable dado que el aporte de C supera los 4,5 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ necesarios para no generar disminuciones en los contenidos de COT al sur de Santa Fe.

Palabras clave. Trigo; avena; vicia; agua disponible; carbono orgánico total.

USE OF COVER CROPS IN SOYBEAN MONOCULTURE: EFFECTS ON WATER AND CARBON BALANCE

ABSTRACT

Cover crops (CC) are a good alternative to improve soil mulch and carbon (C) balance under no tillage with soybean monoculture (*Glycine max* L. Merr.), predominant in the Pampean Region. This study (2006-2011) evaluated the effect of winter CC -wheat (T), oats (A), vetch (V) and oats+vetch (A+V)- on water consumption, dry matter (MS) production and soil organic carbon contents (COT) using a control (Ct) without CC. Biomass production of the CC was closely related to rainfall recorded between the months of June and October. In general, T and A treatments contributed greater amounts of MS, on average, biomass production was 24 and 91% higher compared to A+V and V. The water cost of including CC was 13-93 mm compared to Ct. At soybean seeding, in general, Ct presented the highest water content. However, this treatment. Showed a loss of moisture by evaporation without biomass production, which is used by the CC to fix between 18 and 303 kg C ha⁻¹ mm⁻¹ depending on the conditions that year. The use of T, A and A+V increased the COT at a rate of 597 to 98 kg C ha⁻¹ yr⁻¹ at 0-25 cm depth, while those without CC and with legumes (V) decreased 824 and 289 kg C ha⁻¹ yr⁻¹, respectively. For conservation or increase of the COT, use of A, A+V and T like CC would be a feasible option given that it exceeds the minimum source C input of 4.5 Mg C ha⁻¹ necessary to maintain the COT south of Santa Fe.

Key words. Wheat; oat; vetch; available water; total organic carbon.

1 Becario CONICET, CERZOS-UNS

2 AER INTA Cañada de Gómez

3 Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), CERZOS-UNS

4 EEA INTA Oliveros

*Autor de contacto: mduval@criba.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción en la Región Pampeana han experimentado importantes cambios durante los últimos 15 años, donde existen grandes extensiones de suelo bajo siembra directa (SD) con predominio de soja (*Glycine max* L. Merr.). Estos sistemas agrícolas se caracterizan por largos períodos de barbecho otoño invernal, bajo aporte anual de carbono (C) al suelo ($2\text{--}3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) (Restovich *et al.*, 2005) y disminución de los contenidos de materia orgánica del suelo (MO) (Huggins *et al.*, 2007). Estos efectos generan una progresiva disminución de la fertilidad física y química edáfica (Andriulo & Cordone, 1998; Lavado, 2006). A partir de la alta frecuencia de soja en la rotación, la ausencia de cobertura comienza a visualizarse como una limitante para los sistemas de producción actuales. Para lograr la sustentabilidad de estos sistemas productivos, es necesario mejorar el balance de C a través de un mayor aporte de biomasa vegetal. En este sentido, los cultivos de cobertura (CC) son una herramienta agronómica que incrementa los aportes de C, además de promover al desarrollo y mantenimiento de la cobertura de los suelos mejorando las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo (Daliparthi *et al.*, 1994). En la Región Pampeana, los CC han sido recomendados para sistemas tales como monocultivos de soja donde la producción de residuos es insuficiente para una adecuada cobertura y protección del suelo (Novelli *et al.*, 2011) siendo el objetivo primordial en estas condiciones optimizar el balance de C (Hendrix *et al.*, 1998; Ding *et al.*, 2006). Sin embargo, el consumo hídrico por parte de los CC durante el período de invierno/primavera afectaría la oferta de agua para el cultivo posterior (Quiroga *et al.*, 2007) y se desconocen los efectos acumulados de diferentes estrategias de manejo con CC sobre la calidad y productividad de los suelos al sur de la provincia de Santa Fe.

En esta región, según la carta de suelos de la zona de Rosario-Cañada de Gómez (INTA, 1988), el balance hídrico mensual utilizando el método de Thornthwaite presenta saldos positivos entre precipitación y evapotranspiración potencial para los meses de Marzo a Noviembre y negativos en los meses de verano. Es decir, existe un exceso de agua en los meses de otoño (Marzo, Abril y Mayo) que permite recargar el perfil del suelo, mientras que el excedente generado en los meses de invierno y hasta principio de Noviembre (fecha de siembra de la soja) se perdería por evaporación, percolación, escurrimiento, etc., dado que se ha alcanzado la capacidad máxima de acumulación de agua del suelo. La eficiencia con la que un cultivo produce materia

seca por unidad de agua consumida, se conoce como eficiencia en el uso del agua (EUA) (Dardanelli *et al.*, 2003). Una alternativa para aumentar la EUA es la inclusión de CC que utilizan el agua que se perdería del sistema sin ser utilizada, aumentando la entrada de residuos, mejorando el aporte anual de C al sistema.

Como objetivos del siguiente trabajo se planteó: (i) analizar el efecto de diferentes especies de CC sobre el consumo de agua y cantidad de materia seca producida y, (ii) evaluar su contribución a los contenidos de COT con el propósito identificar aquellos que mejor lo conserven y/o aumenten.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio

El ensayo se estableció sobre un lote de 30 ha ubicado en la localidad de Correa, provincia de Santa Fe ($32^{\circ}57'21'' \text{ S}$, $61^{\circ}18'18'' \text{ O}$). El lote presentaba una historia agrícola de 40 años, los últimos 10 en siembra directa, con predominio de soja (*Glycine max* L. Merr.) y barbecho invernal en la rotación. El clima de la región es templado, sin gran amplitud térmica anual. El régimen pluviométrico tiende a ser monzónico, con concentración de lluvias en verano. En el período de Octubre a Marzo se concentra aproximadamente el 70% de las lluvias anuales. La precipitación y temperatura media anual es de 1019 mm y $17,5^{\circ}\text{C}$, respectivamente (período 1957-2005). El suelo donde se realizó el ensayo correspondió a un Argiudol típico, serie Correa, profundo y bien drenado con textura franco limosa en su horizonte superficial (Tabla 1).

Tratamientos y diseño experimental

En Junio de 2006 se inició un ensayo de monocultivo de soja con diferentes antecesores invernales. Los CC utilizados fueron: (1) trigo pan (T) (*Triticum aestivum* L.) (2) avena (A) (*Avena sativa* L.), (3) Vicia (V) (*Vicia sativa* L.), (4) avena+vicia (A+V) y un tratamiento control (Ct) (sin CC) que se mantuvo libre de vegetación con aplicaciones de herbicidas. Los tratamientos fueron dispuestos en un diseño en bloques completos aleatorizados con 3 repeticiones y parcelas de 500 m².

Manejo de los cultivos

Entre Mayo y Julio de cada año se sembraron los CC bajo el sistema de SD (Fig. 1). Las densidades de siembra utilizadas fueron de 110, 60 y 45 kg semilla ha⁻¹ para T, A y V, respectivamente. La consociación A+V, se sembró con densidades de siembra de 30 kg semilla ha⁻¹ de ambas especies. Todos los CC fueron fertilizados al momento de la siembra con 7 kg ha⁻¹ de fósforo (P) y 8,4 kg ha⁻¹ de azufre (S) en forma de superfosfato simple (SFS). Las especies gramíneas, además, se fertilizaron

Tabla 1. Características físicas y químicas del suelo al inicio del ensayo (2006).

Table 1. Physical and chemical soil characteristics at start of trial (2006).

Horizonte		A	B1	B21	B22	B3	C1	C2ca
Espesor	cm	25	25	20	25	30	35	40
Arena		102	—	—	—	—	—	—
Limo	g kg ⁻¹	699	—	—	—	—	—	—
Arcilla		199	—	—	—	—	—	—
Textura		Franco limosa	—	—	—	—	—	—
DA	Mg ha ⁻¹	1,33	1,38	1,35	1,33	1,26	1,26	1,25
CC	mm	96	106	82	89	92	107	122
PMP	mm	51	67	51	50	52	60	69
AUT	mm	45	39	32	39	40	47	53
COT	g kg ⁻¹	16,6	—	—	—	—	—	—
Pe	mg kg ⁻¹	17	—	—	—	—	—	—
pH		6,0	—	—	—	—	—	—

DA: Densidad aparente; CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchitez permanente; AUT: Agua útil total; COT: Carbono orgánico total; Pe: Fósforo extraíble.

DA: Bulk density; CC: Field capacity; PMP: Permanent wilting point; COT: Total organic carbon; Pe: Extractable phosphorus.

con 51 kg ha⁻¹ de nitrógeno (N) en forma de urea a la siembra. La supresión del crecimiento de los CC se realizó en el mes de Noviembre con glifosato con dosis de 2,5/3 L ha⁻¹ (480 g equivalente ácido L⁻¹), aproximadamente a los 145 días desde su siembra, en estadios reproductivos. El criterio que se tuvo en cuenta para definir el momento de supresión fue que los cultivos de gramíneas llegaran a floración, a fin de lograr una elevada producción de materia seca total, sin comprometer la fecha de siembra óptima del cultivo de soja, la cual fue 10 a 60 días posteriores a la supresión de los CC (Fig. 1). La soja (cultivar ADM 4200) se sembró empleando semillas tratadas con inoculantes y fungicidas, con una densidad de 40 semillas por m². La soja se fertilizó con P, S y Ca a la siembra, a razón de 6,8, 16,7 y 24 kg ha⁻¹, respectivamente, mediante la utilización de mezclas de SFS y sulfato de calcio.

Muestreo de los cultivos de cobertura

La producción de materia seca aérea total (MS) de las distintas especies de CC se determinó al momento de secado de los mismos. Se extrajeron 10 muestras de 0,5 m² de cada unidad experimental y se pesó el total del material verde obtenido. Después de pesar el material fresco, 200 g de cada muestra se llevaron a estufa eléctrica (65 °C) hasta lograr un peso constante y determinar peso seco de la muestra. A partir del peso seco de esta alícuota se determinó la producción de MS. Luego la muestra fue molida (2 mm) para determinar la concentración de C mediante combustión seca utilizando analizador de carbono LECO CR12 (LECO, St. Joseph, MI, EE.UU.). El aporte de C total se obtuvo mediante la concentración de C y el aporte de MS de los CC.

Monitoreo del contenido hídrico del suelo

Al inicio del ensayo, se realizó en cada horizonte la caracterización física del suelo (Tabla 1). La densidad aparente se determinó mediante muestras sin disturbar por el método del cilindro (Blake & Hartge, 1986). Se determinó el contenido de agua a capacidad de campo mediante olla de presión a 33 kPa (Klute, 1986) y el contenido de agua a punto de marchitez permanente mediante membrana de presión a 1500 kPa (Richards, 1947). El agua útil (AU) del suelo se calculó como la diferencia entre el contenido de agua a capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Luego de finalizar el ciclo de los CC y/o el barbecho tradicional y al momento de la siembra del cultivo de soja, se determinó el contenido de humedad del suelo a través de sondas de neutrones hasta los 200 cm de profundidad. Se calculó el uso consuntivo (UC) mediante la suma del contenido de agua útil disponible al momento de la siembra y las precipitaciones ocurridas durante el ciclo de los CC, a la cual se le restó el contenido de agua útil disponible al momento de finalizar el ciclo de los CC (Ec. 1).

$$UC \text{ (mm)} = AD_i + PP - AD_f \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde AD_i y AD_f es el contenido de agua útil disponible en el suelo a la siembra y secado de los CC (mm), respectivamente y PP son las precipitaciones acumuladas en el período de crecimiento de los CC (mm).

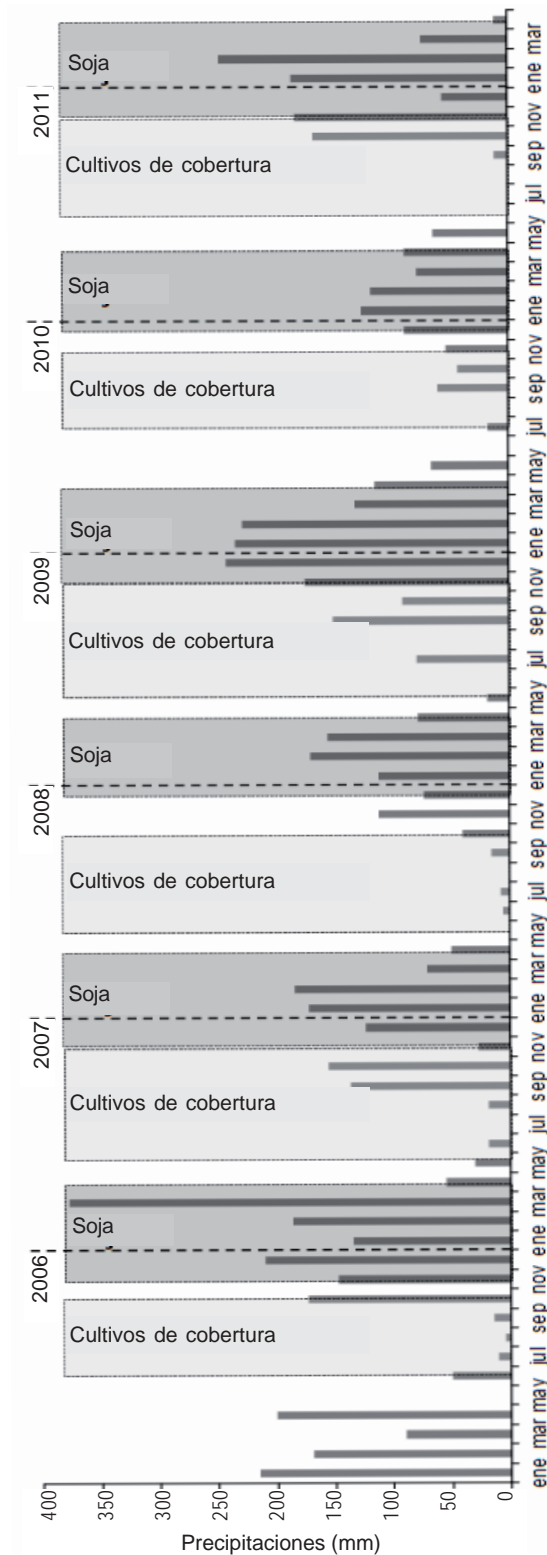


Figura 1. Precipitaciones mensuales registradas durante el período evaluado (2006-2011) y disposición de los cultivos de cobertura y soja.

Figure 1. Monthly rainfall recorded during the evaluation period (2006-2011) and arrangement of cover crops and soybeans.

La eficiencia en la utilización del agua (EUA) se calculó mediante el cociente entre la MS y su UC (Ec. II).

$$EUA \text{ (kg MS mm}^{-1}\text{)} = \frac{MS}{AD_i + PP - AD_f} \quad \text{(Ecuación II)}$$

La eficiencia de captación de carbono (ECC) de los CC se calculó mediante el cociente entre el carbono aportado por los CC y su UC (Ec. III), y la ECC según el consumo adicional de agua de los CC calculado como la diferencia entre el UC de los CC (UC_{CC}) y el control (UC_B) (Ec. IV).

$$ECC \text{ (kg C mm}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Carbono}_{CC}}{AD_i + PP - AD_f} \quad \text{(Ecuación III)}$$

$$ECC \text{ (kg C mm}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Carbono}_{CC}}{UC_{CC} - UC_B} \quad \text{(Ecuación IV)}$$

La eficiencia de barbecho (EB) se calculó utilizando la ecuación de Mathews & Army (1960) (Ec. V).

$$EB \text{ (kg C mm}^{-1}\text{)} = \frac{AD_f - AD_i}{PP} \times 100 \quad \text{(Ecuación V)}$$

El costo hídrico (CH) se calculó como la diferencia de agua útil disponible en el suelo en los diferentes tratamientos con CC al momento de secado en relación al tratamiento control (sin CC) (Fernández *et al.*, 2007) (Ec. VI).

$$CH \text{ (mm)} = AD_b - AD_{CC} \quad \text{(Ecuación VI)}$$

Dónde AD_b es el contenido de agua disponible en barbecho y AD_{CC} es el contenido de agua disponible en los CC determinados al momento de su secado.

Balance de carbono

Durante los años 2006 y 2011, se realizó el muestreo de suelos para evaluar el efecto de la inclusión de los CC sobre el COT luego de cinco años. En cada año, dentro de cada parcela, las muestras de suelo (3 réplicas) fueron tomadas al azar en el horizonte A (0-25 cm). Luego de secadas al aire y tamizadas por 2 mm se realizó la determinación de COT por combustión (1500 °C) con analizador automático (LECO, St. Joseph, MI).

Se calculó la cantidad de C mínima necesaria aportada por los residuos aéreos (CC + soja) para no generar disminuciones en los contenidos de COT. Para ello, se realizó el balance de C entre los años 2006 y 2011 ($\Delta COT_{2011-2006}$) y se relacionó con la entrada anual de C por parte de los residuos aéreos (CC + soja), $C_{residuo}$ ($Mg \text{ C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). El aporte de C por

los CC se determinó como fue explicado anteriormente, mientras que el aporte de C por parte de la soja se estimó en base a los rendimientos e índice de cosecha de 0,47 (Johnson *et al.*, 2006).

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados utilizando el software estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2013). Para el análisis estadístico de los resultados se utilizó análisis de varianza (ANOVA). Cuando se detectaron diferencias significativas en las variables medidas, se aplicó la prueba de comparación de medias mediante diferencias mínimas significativas (DMS) utilizando un nivel de significación de 0,05. Se utilizaron modelos de regresión lineal con intervalos de confianza del 95% para evaluar la relación entre la producción de MS y las variables climáticas y el cambio en el COT con el aporte de C por los CC y el cultivo de soja.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Producción de materia seca y aporte de carbono

Durante el periodo 2006–2011, la cantidad de biomasa por parte de los CC aportada al suelo presentó diferencias significativas entre CC ($p < 0,001$), entre años ($p < 0,001$)

e interacción significativa ($p < 0,001$) (Tabla 2). Para todos los años, los tratamientos T y A, en promedio, presentaron una producción de MS 24 y 91% superior a los de A+V y V, respectivamente; a su vez también se observaron diferencias significativas entre A+V y V, donde la leguminosa pura presentó las menores producciones de MS, salvo en el año 2011, donde no se hallaron diferencias (Tabla 2). La MS acumulada hasta el momento de secado para los CC en los años evaluados fue entre 2,5 y 11,1 Mg ha⁻¹ (Tabla 2). Las gramíneas produjeron entre 4,6 y 11,1 Mg ha⁻¹, diferenciándose significativamente de V con producciones de MS entre 2,5 y 4,6 Mg ha⁻¹. El tratamiento A+V presentó producciones de MS entre 4,9 y 8,5 Mg ha⁻¹ siendo inferiores a las de gramíneas puras en los años 2006, 2009 y 2010. Las variaciones interanuales en la producción de MS por parte de los CC estuvieron fuertemente influenciadas por las precipitaciones registradas en cada año (Tabla 2 y 3). En los años 2008 y 2011 el crecimiento de los CC fue afectado por las escasas precipitaciones recibidas, lo que determinó una baja producción general de biomasa aérea. Según lo informado por Kuo & Jellum (2000), la producción de biomasa aérea de los CC puede variar considerablemente de un año a otro debido, principalmente, a las condiciones climáticas. La precipitación acumulada durante

Tabla 2. Producción de materia seca aérea total (Mg MS ha⁻¹) y de carbono (Mg C ha⁻¹) de los cultivos de cobertura.
Table 2. Aboveground dry matter production (Mg MS ha⁻¹) and carbon (Mg C ha⁻¹) of cover crops.

Año	Trigo	Avena	Avena + Vicia	Vicia	Promedio
2006	7,9 bC	7,2 bcBC	5,9 cB	3,1 abA	6,0 ± 2,0
2007	8,3 bB	8,8 cB	8,5 eB	5,7 dA	7,8 ± 1,6
2008	5,5 aB	5,2 abB	4,9 bB	3,2 abA	4,7 ± 1,0
2009	10,7 cC	11,1 dC	7,6 dB	4,6 cdA	8,5 ± 2,8
2010	8,0 bC	7,2 bcC	5,8 cB	4,1 bcA	6,3 ± 1,6
2011	4,6 aB	4,8 aB	3,5 aAB	2,5 aA	3,9 ± 1,2
Promedio	7,5 ± 2,1	7,4 ± 2,4	6,0 ± 1,7	3,9 ± 1,2	
C (Mg ha ⁻¹)					
2006	3,4 bC	3,2 bcBC	2,6 cB	1,4 abA	2,7 ± 0,9
2007	3,6 bB	3,9 cB	3,8 eB	2,6 dA	3,5 ± 0,7
2008	2,4 aB	2,3 abB	2,2 bB	1,4 abA	2,1 ± 0,4
2009	4,6 cC	4,9 dC	3,4 dB	2,1 cA	3,8 ± 1,2
2010	3,5 bC	3,2 bcC	2,6 cB	1,9 bcA	2,8 ± 0,7
2011	2,0 aB	2,1 aB	1,6 aAB	1,1 aA	1,7 ± 0,5
Promedio	3,3 ± 0,9	3,3 ± 1,1	2,7 ± 0,8	1,8 ± 0,6	

En cada fila, letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre cultivos de cobertura, para cada columna letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre años, ($p < 0,05$).

In each row, different upper case letters indicate significant differences between cover crops, for each column different lowercase letters indicate significant differences between years ($p < 0.05$).

Tabla 3. Contenido de agua útil (0-200 cm) a la siembra y al momento de secado de los cultivos de cobertura, costo hídrico (CH), uso consuntivo (UC), eficiencia de uso del agua (EUA) y precipitaciones (PP) durante el ciclo de crecimiento.

Table 3. Available water content (0-200 cm) at sowing and killing cover crops, water cost (CH), consumptive use (UC), water use efficiency (EUA) and rainfall (PP) during the growing season.

Año	Tratamiento	Agua (siembra)	Agua (secado)	CH	UC	EUA	PP (ciclo)
		mm				kg MS mm ⁻¹	mm
2006	Ct	247 a	224 d	—	—	—	
	T	238 a	201 b	-23 b	205 b	38 b	
	A	245 a	211 c	-13 c	202 b	36 b	168
	A+V	247 a	140 a	-84 a	275 c	22 a	
	V	243 a	235 e	0 d	176 a	18 a	
2007	Ct	264 b	293 e	—	—	—	
	T	252 a	201 a	-92 a	380 c	22 ab	
	A	255 a	245 b	-48 b	338 b	26 b	329
	A+V	258 ab	258 c	-35 c	329 a	26 b	
	V	256 a	262 d	-31 d	323 a	18 a	
2008	Ct	212 a	132 e	—	—	—	
	T	213 ab	51 b	-82 b	190 c	29 c	
	A	223 bc	39 a	-93 a	212 d	25 b	28
	A+V	208 a	87 d	-45 d	149 a	33 c	
	V	225 c	77 c	-55 c	176 b	18 a	
2009	Ct	164 c	159 c	—	—	—	
	T	138 b	109 a	-50 a	382 c	28 c	
	A	134 ab	110 a	-48 a	376 bc	30 c	353
	A+V	129 a	109 a	-50 a	372 ab	21 b	
	V	138 b	123 b	-36 b	368 a	12 a	
2010	Ct	146 ab	152 e	—	—	—	
	T	155 cd	103 c	-49 c	172 ab	46 c	
	A	157 d	98 b	-54 b	179 b	40 c	120
	A+V	142 a	86 a	-66 a	176 b	33 b	
	V	150 bc	106 d	-46 c	164 a	25 a	
2011	Ct	132 a	148 e	—	—	—	
	T	141 abc	103 c	-45 c	215 a	22 b	
	A	148 c	114 d	-33 d	211 a	23 b	177
	A+V	137 ab	65 a	-82 a	249 c	14 a	
	V	143 bc	95 b	-53 b	226 b	11 a	

Para cada año, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos, ($p < 0,05$).

For each year, different letters indicate significant differences between treatments ($p < 0.05$).

el período de crecimiento activo presentó un efecto significativo sobre la producción de biomasa de los CC (Fig. 2). La precipitación acumulada entre Junio y Octubre de cada año (2006–2011) osciló entre un mínimo de 28 mm en 2008 a un máximo de 353 mm en 2009 (Tabla 3), y tuvo una influencia significativa con la producción de biomasa de los CC (Fig. 2).

La variación en MS entre CC responde a las diferentes eficiencias de utilización del agua y de otros factores, como el largo del ciclo (Tabla 3). La EUA osciló entre 22 a 46, 25 a 40, 21 a 33 y 11 a 25 kg MS mm⁻¹ en T, A, A+V y V, respectivamente. Diferencias en los contenidos de agua disponible en el suelo y precipitaciones entre años pueden modificar el comportamiento de un mismo cultivo afectan-

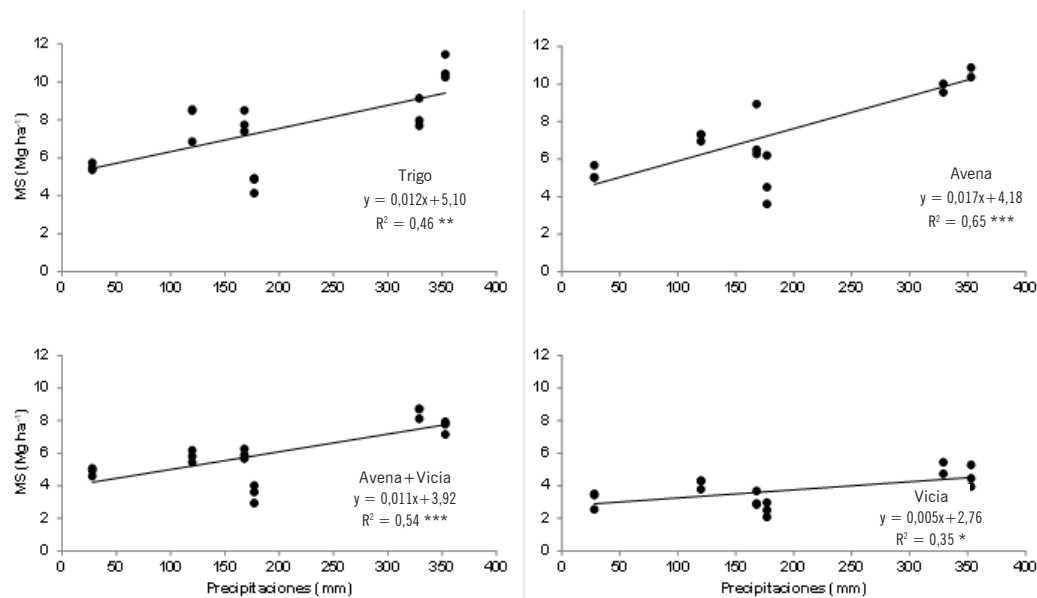


Figura 2. Relación entre la producción de materia seca (Mg MS ha⁻¹) de los cultivos de cobertura y las precipitaciones registradas durante su ciclo (n=18), período 2006-2011.

Figure 2. Relationship between dry matter yield (Mg MS ha⁻¹) of cover crops and rainfall during the cycle (n=18), 2006-2011.

do la EUA (Huang *et al.*, 2003). Las gramíneas (T y A) presentaron los mayores valores de EUA, entre 22 a 46 kg MS mm⁻¹, mientras que V presenta valores < 18 kg MS mm⁻¹ para la mayoría de los años. A su vez, en aquellos años donde las precipitaciones fueron muy escasas, T y A presentaron la capacidad de generar mayor cantidad de biomasa que V. Unger & Vigil (1998) también observaron que las gramíneas se adaptan mejor como CC que las leguminosas debido a su mayor generación de biomasa en condiciones de sequía. La generación de biomasa depende en gran medida de la especie y del cultivar utilizado. En este trabajo se demostró que la producción de biomasa de T y A fue superior al de V, tal como los resultados obtenidos por varios autores (Neal *et al.*, 2011; Restovich *et al.*, 2012) donde las gramíneas duplicaron en producción a la leguminosa. A su vez, la vicia presenta un crecimiento lento, en etapas iniciales, y un crecimiento más rápido recién en primavera debido principalmente al aumento de temperatura (Sainju *et al.*, 1998). Este hábito de crecimiento diferente, en relación a las gramíneas, también influyó en la producción de MS.

La cantidad de C añadido al suelo por parte de los CC presentaron diferencias entre tratamientos donde, al igual que en la MS, las gramíneas fueron las especies que ma-

yores aportes de C realizaron al suelo. Valores medios se observaron en A+V, mientras que V presentó los menores aportes durante los seis años evaluados (Tabla 2). Los aportes de las gramíneas fueron entre 2,0 y 4,9 Mg C ha⁻¹, valores entre 1,6 y 3,8 Mg C ha⁻¹ se observaron en A+V, mientras que V presentó los menores aportes de C, entre 1,1 y 2,6 Mg C ha⁻¹. Estas diferencias en los aportes de C por parte de los CC se deben a la producción de MS, dado que no se encontraron diferencias significativas en la concentración de C de las diferentes especies (43-45% C).

Se observaron diferencias en la eficiencia de captación de carbono (ECC) entre los distintos CC, donde las condiciones particulares de cada año afectaron significativamente la ECC (Fig. 3a). En general, los CC con mayor ECC fueron T y A, presentando valores entre 7 y 22 kg C mm⁻¹. Estas diferencias se debieron a la duración del ciclo de ambos CC, en donde a medida que se extendía el ciclo de crecimiento, disminuyó la cantidad de C producido por mm de agua consumida (Fig. 4). Los valores de ECC para A+V fueron entre 5 y 16 kg C mm⁻¹, mientras que V presentó los valores más bajos en todos los años evaluados (4-12 kg C mm⁻¹). En ambos tratamientos, a diferencia de T y A, no se observó ningún tipo de relación entre la ECC y la

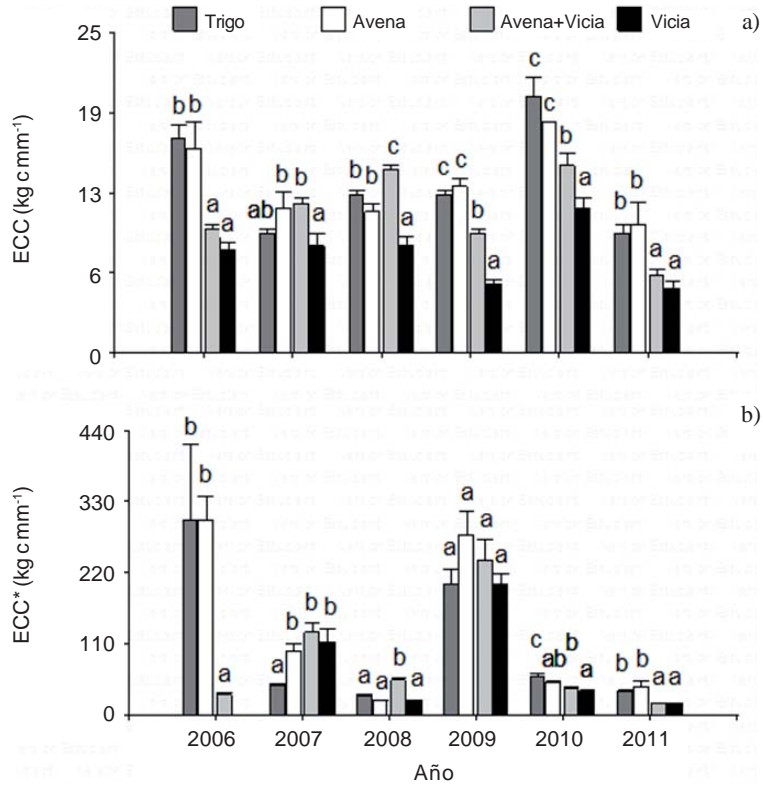


Figura 3. Eficiencia de captación de carbono de los cultivos de cobertura (ECC) calculada según el uso consuntivo de los cultivos de cobertura (a) y (ECC*) calculada según la diferencia con el UC del control (b).

Figure 3. Carbon capture efficiency of cover crops (ECC) calculated according to the consumptive use of cover crops (a) and (ECC*) calculated as the difference with the UC of control (b).

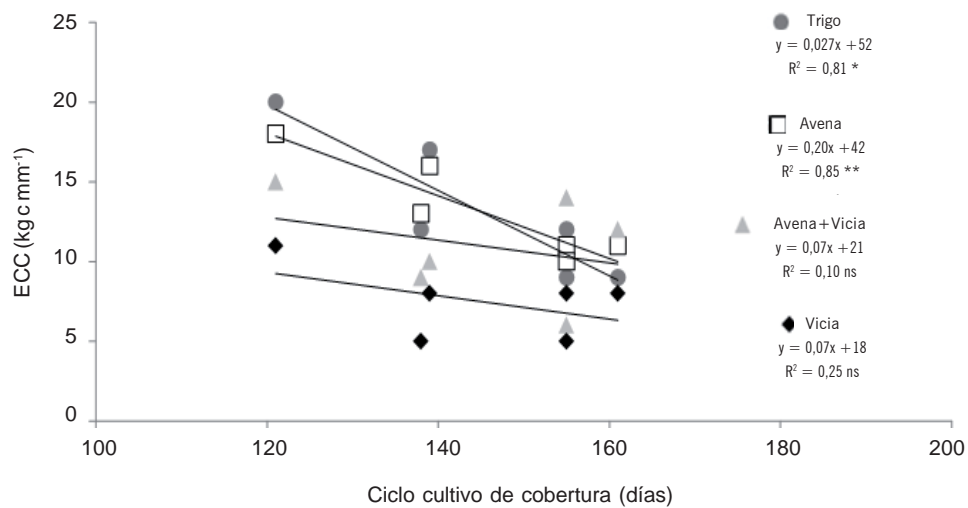


Figura 4. Relación entre la eficiencia de captación de carbono (ECC) y la duración del ciclo de los cultivos de cobertura.

Figure 4. Relationship between the efficiency of carbon capture (ECC) and cycle length of cover crops.

duración del ciclo, posiblemente al rápido crecimiento de la vicia en primavera, debido principalmente al aumento de temperatura (Sainju *et al.*, 1998).

Si bien la cantidad de agua almacenada durante el barbecho disminuyó significativamente con el uso de los CC, el barbecho tradicional también fue ineficiente en el almacenamiento de agua observándose eficiencias muy bajas (< 10%) o, incluso en ciertos años eficiencias negativas (Tabla 3). En este sentido, Cayci *et al.* (2009) indicaron que sólo entre el 12-20% de las precipitaciones ocurridas en la época de barbecho son retenidas al momento de la siembra del próximo cultivo, valores similares a los observados en el presente trabajo. Es decir, gran parte de las precipitaciones ocurridas durante el barbecho se perdieron por evaporación, escurrimiento y/o drenaje. Por lo tanto, podemos calcular la ECC según el UC de cada tratamiento con Ct (Fig. 3b). En este caso, obtenemos valores muy superiores de ECC, de 18 a 303 kg C mm⁻¹.

Balance de agua y efecto de los CC sobre la disponibilidad de agua al secado y siembra del cultivo posterior

En los años 2006 y 2007, al momento de supresión de los CC, el barbecho tradicional (Ct) presentó un 76 y 99% de la capacidad de almacenamiento de agua útil (CAU) en 0-200 cm de profundidad (295 mm). En el resto de los años, donde se observaron períodos de escasas precipitaciones, Ct solo alcanzó entre 45 y 54% de la CAU. En todos los años, los CC disminuyeron significativamente el contenido de agua útil disponible en 13 a 93 mm en comparación con Ct (Tabla 3). Este consumo hídrico por parte de los CC coincide con los resultados hallados por Restovich *et al.* (2012) evaluando diferentes especies como CC sobre un Argiudol típico de similares características al de nuestro estudio. El único tratamiento que presentó un mayor contenido de agua útil disponible en relación con Ct fue V (11 mm) en el año 2006, es decir, la producción de carbono en este tratamiento, 1400 kg C ha⁻¹, no tuvo ningún costo hídrico, ya que al final del barbecho se observaron 23 y 8 mm menos con respecto al inicio del barbecho en Ct y V, respectivamente.

Para los años 2006, 2010 y 2011, el tratamiento con mayor CH fue A+V, dejando, en el espesor 0-200 cm, entre 82 y 66 mm menos que Ct (entre 22 y 44% de CAU). En el 2007, el tratamiento de mayor CH fue T, con 92 mm menos que Ct (68% de CAU). En el 2008, año con precipitaciones de 28 mm durante el barbecho, el mayor CH lo presentó A, 93 mm menos que Ct. Sin embargo, en este año todos los CC disminuyeron drásticamente los contenidos de agua útil disponible en el perfil del suelo, almace-

nando únicamente entre 13 y 30% de la CAU. En el 2009, los tratamientos T, A y A+V la disminuyeron alrededor de 50 mm con respecto a Ct, diferenciándose estadísticamente de V que presentó un menor CH (36 mm) (Tabla 3). En promedio, para los 6 años evaluados, los contenidos de agua útil disponible fueron 33, 30, 36 y 24% menores que en Ct para T, A, A+V y V, respectivamente.

Distribución del agua útil en el perfil al momento de la siembra de soja

Luego del secado, si bien los CC consumieron parte del agua acumulada, no agotaron el perfil, quedando reservas de 13 al 89% de la CAU, para el cultivo de soja siguiente. Esta gran diferencia en los contenidos de agua útil disponible se deben, por un lado, a los registros pluviométricos contrastantes observados en los diferentes años que van de 28 a 353 mm influyendo en la producción de biomasa de los CC y por ende en el consumo de agua y, por otro lado, a la longitud del barbecho desde la supresión de los CC que varió desde 10 a 60 días (Fig. 1). La longitud del barbecho estuvo estrechamente relacionado con las precipitaciones caídas durante dicho período ($R^2=0,76$, $p < 0,05$). Por lo tanto, la longitud variable del barbecho para los diferentes años evaluados permitió captar diferentes cantidades de precipitaciones, las cuales fueron entre 10 y 150 mm. En la Figura 5 se observa la distribución de la humedad del suelo por horizonte hasta los 200 cm de profundidad en los diferentes tratamientos al momento de la siembra de la soja. La humedad al momento de la siembra presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), entre años ($p < 0,001$) e interacción significativa ($p < 0,001$) (Fig. 5). En general, Ct presentó los mayores contenidos agua disponible al momento de la siembra del cultivo de soja. Sin embargo, los tratamientos con CC incrementaron los valores de agua disponible con respecto al momento de secado (Tabla 3). El tratamiento A+V tuvo los menores contenidos de agua disponible en todas las profundidades evaluadas y dejó el perfil más seco para la implantación del cultivo de soja en el 2006 (<60% de la CAU), mientras que en el 2007, T presentó los menores valores de humedad en todo el perfil. Los contenidos de agua disponible dentro del perfil a la siembra del cultivo de soja variaron en cada estrato de suelo (Fig. 5). En el horizonte superficial (0-25 cm) se observaron diferencias en el contenido de agua disponible entre Ct y A+V en el 2006, entre Ct y T en el 2007, donde los CC presentaron 11 y 13 mm menos, respectivamente. En el resto de los años si bien se observaron diferencias entre Ct y los CC, las mismas no superaron los 10 mm en 0-25 cm (Fig. 5).

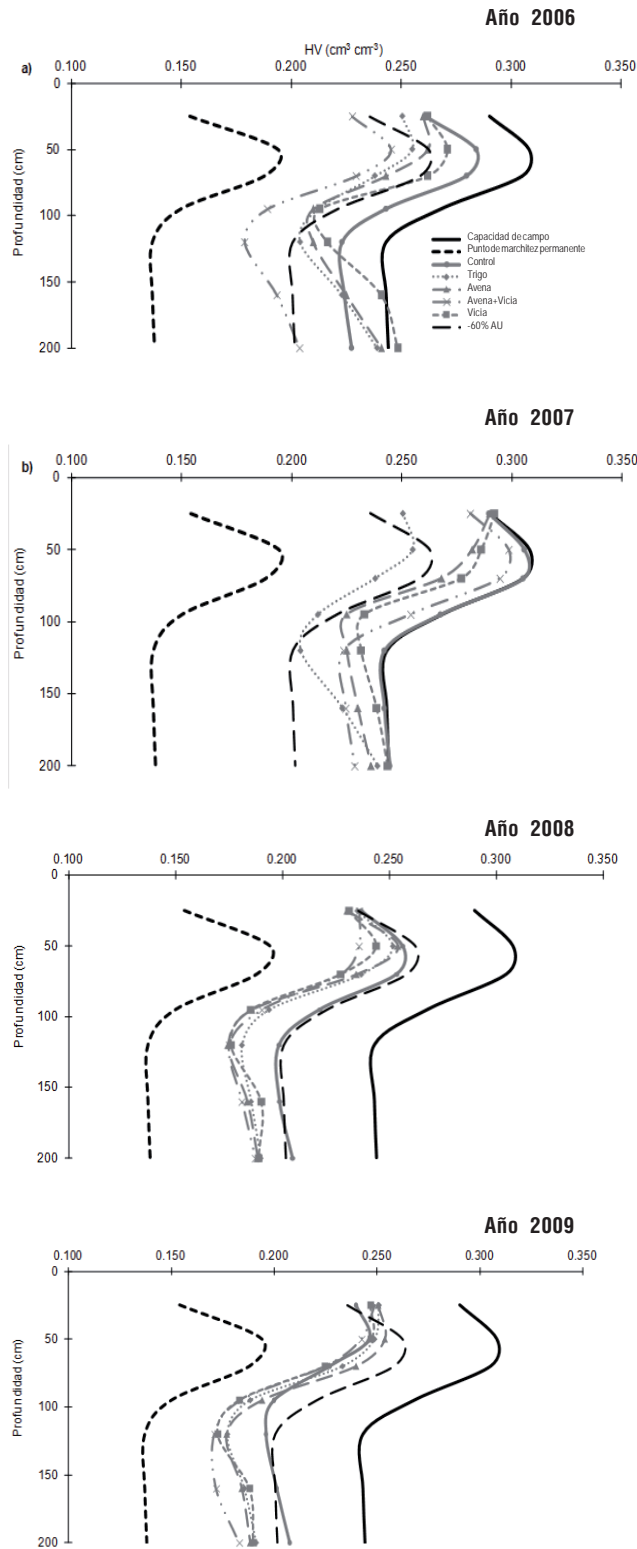


Figura 5. Distribución del agua por horizonte en los diferentes tratamientos de cobertura a la siembra de la soja.

Figure 5. Water distribution in the different coverage treatments at soybean planting.

Prof (cm)	Ct	T	A	A+V	V
0-25	b	b -3	b 0	a -11	B 0
25-50	c	ab -10	ab -8	a -13	Bc -4
50-70	d	ab -11	b -10	a -14	C -5
70-95	c	b -10	b -11	a -18	B -10
95-125	c	b -7	b -5	a -17	Bc -2
125-160	b	b 0	b 0	a -14	C 7
160-200	b	c 6	c 7	a -12	D 11

Prof (cm)	Ct	T	A	A+V	V
0-25	c	a -13	c 0	b -3	c 1
25-50	d	a -17	b -8	c -2	b -7
50-70	e	a -18	b -10	d -3	c -8
70-95	e	a -18	b -14	d -4	c -11
95-125	c	a -14	b -6	b -7	b -4
125-160	b	a -8	a -5	a -8	b -2
160-200	c	bc -3	b -4	a -8	c -1

Prof (cm)	Ct	T	A	A+V	V
0-25	b	b -1	a -2	b 0	a -2
25-50	c	bc -2	c -1	a -7	ab -4
50-70	c	b -5	b -5	a -7	a -7
70-95	c	b -8	a -11	ab -9	a -11
95-125	c	b -7	a -9	a -9	a -9
125-160	b	ab -6	a -7	a -8	ab -4
160-200	b	a -8	a -8	a -9	a -8

Prof (cm)	Ct	T	A	A+V	V
0-25	a	b 4	b 4	b 3	b 2
25-50	a	ab 1	b 3	a -1	a 0
50-70	a	ab 2	b 4	a -1	a -1
70-95	b	ab -4	ab -2	a -5	a -6
95-125	b	a -7	a -7	a -9	a -9
125-160	c	b -7	b -7	a -13	b -6
160-200	c	b -8	b -10	a -12	b -9

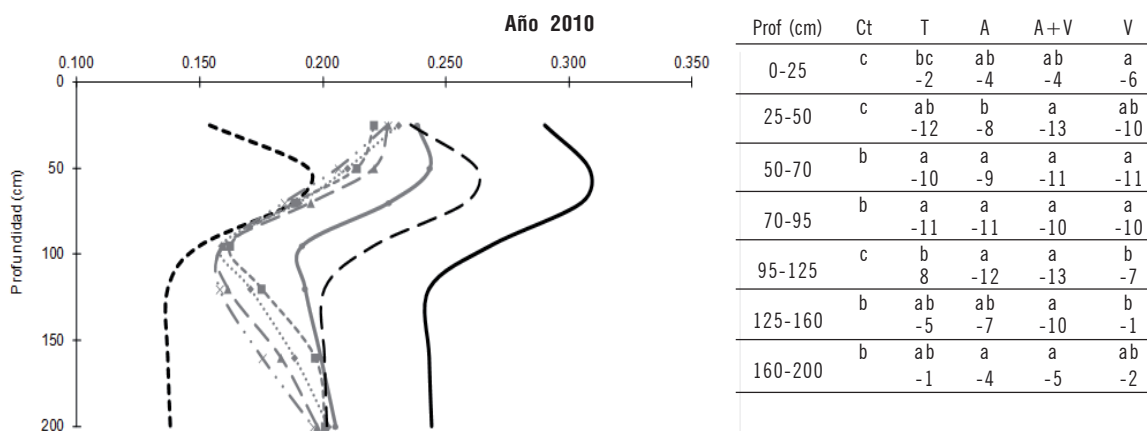


Figura 5. (continuación). Distribución del agua por horizonte en los diferentes tratamientos de cobertura a la siembra de la soja.
Figure 5. Water distribution in the different coverage treatments at soybean planting.

En el 2006, el tratamiento A+V provocó el mayor consumo de agua en el perfil (0-200 cm) seguido por T y A. Dicho consumo se reflejó, principalmente en las capas de 25-50, 50-70 y 70-95 cm de profundidad observándose disminuciones entre 4 y 18 mm. También se observaron diferencias entre CC, donde V presentó mayores contenidos de agua disponible en dichas profundidades. En superficie, las menores diferencias observadas entre tratamientos puede deberse a las precipitaciones recibidas (116 mm) que equilibraron los contenidos de agua entre Ct, V, A y T. En los 95-125 cm los tratamientos T, A y A+V presentaron contenidos de agua disponible significativamente menores que Ct. Sin embargo únicamente A+V presentó contenidos de agua disponible por debajo del 60% de CAU, por lo cual, adelantar el momento de secado sería adecuado en este caso. Restovich *et al.* (2006) consideran que el momento adecuado de secado es aquel en el cual el consumo de agua del CC no es lo suficientemente elevado como para disminuir los contenidos de agua por debajo del 60% de CAU en los horizontes inferiores. En los horizontes más profundos, A+V fue el único tratamiento que presentó menores contenidos de agua disponible que Ct. Este tratamiento presentó los mayores consumos, disminuyendo el AU por debajo del 60% de CAU en todo el perfil.

En el 2007 el consumo de agua por los CC fue mayor al del 2006 presentando disminuciones entre 31 y 92 mm en relación a Ct en 0-200 cm (Tabla 3). Sin embargo las abundantes lluvias ocurridas durante el periodo de barbecho (353 mm) sumado al agua almacenada en el suelo al inicio del barbecho (264 mm) superaron ampliamente la capacidad de almacenamiento máxima de estos suelos (295

mm), haciendo que durante todo el barbecho, hasta la siembra de la soja, Ct se encuentre a capacidad de campo. Dentro de los CC, T fue el tratamiento que mayor consumo de agua generó en el perfil del suelo (92 mm); dicho consumo se reflejó, principalmente, en 25-50, 50-70, 70-95 y 95-125 cm (<60% de CAU). Para el resto de los CC, si bien se observaron disminuciones significativas en el agua disponible con respecto a Ct, los mismos estuvieron por encima del 60% de CAU y en los horizontes más profundos fueron cercanos a capacidad de campo (Fig. 5).

En el 2008, fue un año con muy escasas precipitaciones durante el período de crecimiento de los CC (28 mm). El control, así como los tratamientos con CC, iniciaron el barbecho con más de 200 mm de agua útil disponible (>68% de la CAU). Durante el barbecho, la evaporación directa y el consumo de los CC, redujeron significativamente los contenidos de AU observándose contenidos de humedad menores al 60% de la CAU en todos los tratamientos (Fig. 5). A su vez, se detectaron diferencias entre tratamientos, donde los CC presentaron menores contenidos de humedad que Ct para la mayoría de las profundidades evaluadas. En el horizonte superficial (0-25 cm), no se observaron diferencias en los contenidos de humedad entre Ct y los tratamientos T y A+V, mientras que A y V presentaron valores inferiores. En 25-50 cm, A+V y V presentaron menores contenidos de humedad que Ct, mientras que T y A no se diferenciaron de Ct. La duración de barbecho para este año se consideró media (Carfagno *et al.*, 2013), presentando una duración de 58 días entre la supresión de los CC y la siembra de la soja. Las lluvias ocurridas durante ese período (152 mm) permitieron re-

cargar los horizontes superiores donde, a su vez, los tratamientos T y A presentaron una mejor captación del agua de lluvia. Este efecto se debe a la mayor acumulación de cobertura superficial que disipa la energía de las gotas de lluvia al impactar sobre el suelo (Folorunso *et al.*, 1992). En el resto de los horizontes (50-200 cm), los contenidos de humedad en los tratamientos con CC fueron 34 a 42 mm menos que Ct (Fig. 5).

En el 2009, los contenidos de humedad en superficie (0-25 cm) fueron mayores en los tratamientos con CC sin diferencias entre ellos (Fig. 5). Para las profundidades de 25-50 y 50-70 cm, únicamente A presentó mayor contenidos de humedad con respecto a Ct sin diferencias con los demás tratamientos, mientras que en 70-90 cm los tratamientos A+V y V presentaron 5 y 6 mm menos que Ct. Las lluvias posteriores a la supresión de los CC permitieron recargar el perfil, principalmente en superficie, almacenando más agua que en Ct al momento de la siembra. A su vez, los tratamientos T y A fueron los tratamientos donde se encontró las mayores diferencias con respecto a Ct (7 y 11 mm de agua disponible en 0-70 cm, respectivamente). Por debajo de dicha profundidad, todos los CC presentaron contenidos de agua disponible menores (30 mm promedio) que Ct (Fig. 5).

En el 2010, en general, se observaron menores contenidos de humedad en los CC con respecto a Ct para todas las profundidades evaluadas, observándose en algunos casos (25-50, 50-70 y 70-95 cm) contenidos de humedad cercanos a marchitez permanente. Es decir, a la siembra de la soja, los tratamientos con CC presentaron láminas de agua disponibles significativamente menores que los sistemas de cultivo tradicional (Ct) en todo el perfil de suelo,

con disminuciones entre 49 y 66 mm (Fig. 5). Cabe destacar que tanto T y A, a pesar de la menor oferta hídrica (Tabla 3), ambas especies presentaron igual producción de MS que años con mayor disponibilidad hídrica, e.g. año 2007. Esto demuestra la alta capacidad de ambas especies para adaptarse a escenarios contrastantes sin afectar su productividad.

En general, el contenido de agua disponible en el horizonte superficial (0-25 cm), a la siembra de la soja, no presentó diferencias entre Ct y los CC. Esto concuerda con lo reportado por Álvarez & Scianca (2006) que únicamente encontraron diferencias significativas entre el CC (triticale) y el control en uno de tres años analizados. Como se mencionó anteriormente, contenidos de agua disponible significativamente menores se observaron únicamente en A+V (11 mm menos) y T (13 mm menos) para los años 2006 y 2007, respectivamente (Fig. 5).

Eficiencia de producción de carbono y su efecto sobre el COT

Las diferencias en la cantidad de C de los residuos devueltos al suelo entre los CC y Ct, sumado a las diferencias en el contenido de agua disponible y longitud del barbecho, provocó cambios en los contenidos de COT, aumentando o disminuyendo desde Mayo del 2006 a Diciembre del 2011 (Tabla 4). En general, se considera que se necesitan al menos 4,1 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ aportado por los residuos de cosecha y/o CC para no generar disminuciones del COT en suelos con niveles de COT entre 16,9 y 18,9 g kg⁻¹ en 0-15 cm (Pikul *et al.*, 2008; Benjamin *et al.*, 2010). Si consideramos que el aporte de C por parte de la soja fue similar en todos los tratamientos (aproximada-

Tabla 4. Secuestro de carbono en los suelos bajo barbecho tradicional y con cultivos de cobertura entre Mayo del 2006 a Diciembre del 2011 en 0-25 cm.

Table 4. Carbon sequestered in soils under traditional fallow and cover crops between May 2006 and December 2011 at 0-25 cm depth.

Tratamiento	Inicial (05/2006)	Final (12/2011)	$\Delta_{2011-2006}$	Secuestro de C (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)
	COT (Mg ha ⁻¹)			
Ct		51,1 a	-4,1	-824
T		58,2 c	3,0	597
A	55,2	55,7 bc	0,5	98
A+V		55,8 bc	0,6	128
V		53,8 ab	-1,4	-289

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Different letters indicate significant differences among treatments ($p < 0.05$).

mente 2,0 Mg C ha⁻¹ año⁻¹) (Fig. 6), dado que no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento entre tratamientos, el aporte de C en Ct estuvo muy por debajo del valor crítico señalado por estos autores, mientras que en el caso de los CC, en promedio, el aporte de las gramíneas superó dicho umbral (5,3 Mg C ha⁻¹ año⁻¹) al igual que A+V (4,7 Mg C ha⁻¹ año⁻¹), mientras que V no logró alcanzarlo (3,8 Mg C ha⁻¹ año⁻¹) (Fig. 6). Sobre la base de la producción de biomasa y el contenido de C (Tabla 2), T y A serían mejores opciones de CC en sistemas de monocultivo soja. La inclusión sistemática de CC en las secuencias agrícolas, con alta frecuencia de soja, realizó aportes significativos a la calidad del suelo. Al inicio del ensayo, el contenido de COT fue de 55,2 Mg ha⁻¹, en comparación con los contenidos de COT determinados en el 2011 (quinto año de ensayo)

disminuyó en un 7,4 y 2,5% en Ct y V para 0-25 cm de profundidad, respectivamente (Tabla 4). Por el contrario, el COT aumentó entre un 5,4 a 0,9% en los tratamientos T, A y A+V diferenciándose significativamente de Ct. Como resultado, la utilización de CC (T, A y A+V) en monocultivo de soja aumentó el COT a una velocidad de 597 a 98 kg C ha⁻¹ año⁻¹, mientras que se perdió COT a un ritmo de 824 y 289 kg C ha⁻¹ año⁻¹ sin CC o utilizando leguminosas (V), respectivamente. Para las condiciones de este estudio, teniendo en cuenta el aporte promedio de C (CC+soja) de cada uno de los tratamientos y el cambio en el contenido de COT (Fig. 7), se puede estimar el aporte de C necesario para no generar disminuciones en los contenidos de COT. Mediante la extrapolación de la ecuación de regresión a ΔCOT=0, se necesitan al menos 4,5 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ para

Figura 6. Aportes medios de carbono al suelo por parte de los residuos aéreos de los cultivos de cobertura y soja. Nivel crítico (línea horizontal) (Pikul *et al.*, 2008).
 Figure 6. Means carbon input from aerial biomass residue of cover crops and soybean. Critical level (horizontal line) (Pikul *et al.*, 2008).

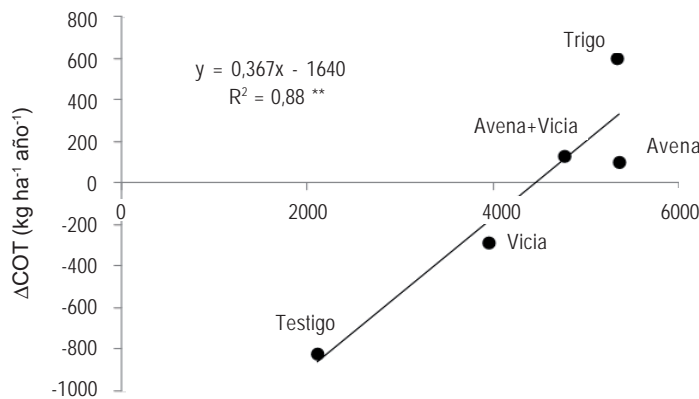
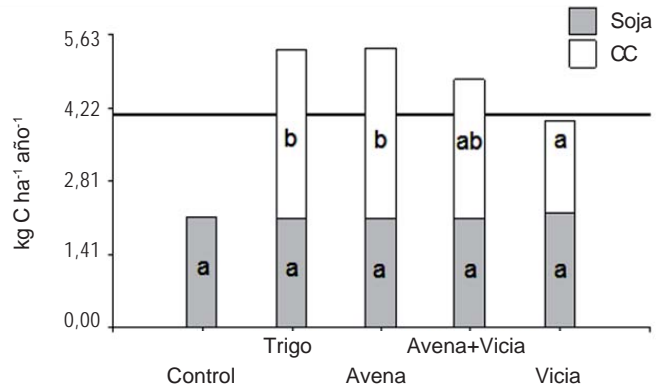


Figura 7. Relación entre el cambio del carbono orgánico total (ΔCOT₂₀₁₁₋₂₀₀₆) en 0-25 cm y el aporte promedio de carbono en superficie de los cultivos de cobertura y soja.

Figure 7. Relationship between change of total organic carbon (ΔCOT₂₀₁₁₋₂₀₀₆) in 0-25 cm depth and the average carbon input of cover crops and soybean.

no generar disminuciones en los contenidos de COT en el horizonte superficial del suelo (0-25 cm). Estos resultados concuerdan con lo mencionado anteriormente sobre el aporte de C reportado por Pikul *et al.* (2008) y Benjamin *et al.* (2010). Por lo tanto, después de cinco años, el aumento del aporte de residuos al suelo por el uso de CC aumentó el almacenamiento de COT en un sistema de monocultivo soja presentando, a su vez, diferencias entre especies. En este sentido, desde el punto de vista de conservación o aumento de los contenidos de COT, los sistemas de cultivo con la inclusión de CC como A, A+V y T serían una opción viable, principalmente este último por los mayores aumentos del COT.

CONCLUSIONES

Luego de 5 años de estudio concluimos que en los agroecosistemas simplificados que predominan actualmente en la Región Pampeana, la utilización de CC contribuye a incrementar los contenidos de COT, aprovechando el agua no utilizada durante los barbechos de invierno. La producción de biomasa de los CC varió considerablemente de un año a otro. La precipitación acumulada entre Junio y Octubre fue el factor principal que afectó a la producción de biomasa de los CC. Desde el punto de vista de máximo retorno de residuos al suelo, trigo y avena fueron las especies más eficientes dada su amplia plasticidad en producir biomasa y capturar carbono bajo diferentes disponibilidades hídricas.

Bajo las condiciones hídricas de este estudio se concluye que si bien el contenido hídrico del suelo al momento del secado de los CC fue menor que el tratamiento control (13 a 93 mm), no influyó sobre el rendimiento de soja en las campañas evaluadas (datos no mostrados). Al momento de la siembra, las diferencias en el agua disponible entre Ct y los CC, en general, no superaron los 10 mm en 0-25 cm permitiendo la adecuada implantación del cultivo de soja.

Las gramíneas como CC fueron más eficientes en producir MS y por consiguiente más eficaces en incrementar el COT en comparación con el barbecho tradicional. Por lo tanto, la inclusión de estas especies invernales en los sistemas agrícolas simplificados es una alternativa de manejo válida para generar cobertura y mejorar el balance de carbono de los suelos bajo monocultivo de soja en el sur de Santa Fe.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, C & C Scianca. 2006. Cultivos de cobertura en molisoles de la región pampeana. Aporte de carbono e influencia sobre propiedades edáficas. Jornada profesional Agrícola. INTA Gral. Villegas.
- Andriulo, A & G Cordone. 1998. Impacto de labranzas y rotaciones sobre la materia orgánica de suelos de la Región Pampeana Húmeda. *En: JL Panigatti; H Marelli; D Buschiazio & R Gil (eds). Siembra Directa. Hemisferio Sur.* Pp. 65-95.
- Benjamin, JG; AD Halvorson; DC Nielsen & MM Mikha. 2010. Crop management effects on crop residue production and changes in soil organic carbon in the central Great Plains. *Agron. J.* 102(3): 990-997.
- Blake, GR & KH Hartge. 1986. Bulk Density: *In: Klute, A. (ed). Methods of Soil Analysis. Part 1 (2nd ed.).* Pp. 363-375. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Carfagno, PF; MJ Eiza; A Quiroga; F Babinec; C Chagas & R Michelena. 2013. Agua disponible en monocultivo de soja con cultivos de cobertura y barbechos reducidos en la Región Semiárida y Subhúmeda Pampeana. *Ci. Suelo* 31(1): 67-81.
- Cayci, G; LK Heng; HS Öztürk; D Sürek; C Kütük & M Sağlam. 2009. Crop yield and water use efficiency in semiarid region of Turkey. *Soil Till Res.* 103: 65-72.
- Daliparthy, J; SJ Herbert & PLM Veneman. 1994. Dairy manure application to alfalfa: crop response, soil nitrate, and nitrate in soil water. *Agron. J.* 86: 927-933.
- Dardanelli, IJ; DJ Collino; ME Otegui & V Sadras. 2003. Capítulo 16: "Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción". *En: Satorre, EH; RL Benech Arnold; GA Slafer; EB De la Fuente; DJ Miralles; ME Otegui & R Savin. (eds) "Producción de cultivos de granos: bases funcionales para su manejo".* Facultad de Agronomía, U.B.A. Pp. 375-440.
- Di Rienzo, JÁ; F Casanoves; MG Balzarini; L González; M Tablada & CW Robledo. 2013. InfoStat. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Ding, G; X Liu; S Herbert; J Novak; A Dula & B Xing. 2006. Effect of cover crop management on soil organic matter. *Geoderma* 130: 229-239.
- Fernández, R; A Quiroga; F Arenas; C Antonini & M Saks. 2007. Contribución de los cultivos de cobertura y las napas freáticas a la conservación del agua, uso consuntivo y nutrición de los cultivos. *En: Quiroga, A & A Bono (eds). Manual de fertilidad y evaluación de suelos.* Pp. 51-59. INTA. EEA Anguil, Argentina.
- Folorunso, OA; DE Rolston; T Prichard & DT Loui. 1992. Soil surface strength and infiltration rate as affected by winter cover crops. *Soil Technol.* 5(3): 189-197.
- Hendrix, P; A Franzluebbers & D McCracken. 1998. Management effects on C accumulation and loss in soils of the southern Appalachian Piedmont of Georgia. *Soil Till. Res.* 47: 245-251.
- Huang, M; M Shao; L Zhang & Y Li. 2003. Water use efficiency and sustainability of different long-term crop rotation systems in the Loess Plateau of China. *Soil Till. Res.* 72: 95-104.
- Huggins, DR; RR Allmaras; CE Clapp; JA Lamb & GW Randall. 2007. Corn-soybean sequence and tillage effects on soil carbon dynamics and storage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 145-154.
- INTA, 1988. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3360-13 y 14- Cañada de Gómez- Rosario. INTA.

- Johnson, JMF; RR Allmaras & DC Reicosky. 2006. Estimating source carbon from crop residues, roots and rhizodeposits using the national grain-yield database. *Agron. J.* 98: 622-636.
- Klute, A. 1986. Water Retention: Laboratory Methods. In: Klute, A. (ed), *Methods of Soil Analysis. Part 1.* (2nd ed.) Pp. 635-661. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Kuo, S & EJ Jellum. 2000. Long-term winter cover cropping effects on corn (*Zea mays* L.) production and soil nitrogen availability. *Biol Fertil Soils* 31: 470-477.
- Lavado, R. 2006. La Región Pampeana: historia, característica y uso de sus suelos. En: Álvarez, R (ed). *Materia orgánica: Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos.* Pp. 1-11. Buenos Aires, Argentina.
- Mathews, O & T Army. 1960. Moisture storage on fallow wheat land in the great plains. *Soil Sci. Am. Proc.* 24: 414- 418.
- Neal, J; W Fulkerson & R Hacker. 2011. Differences in water use efficiency among annual forages used by the dairy industry under optimum and deficit irrigation. *Agric. Water Manage.* 98(5): 759-774.
- Novelli, LE; OP Caviglia & RJM Melchiori. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma* 167-168: 254-260.
- Pikul, JL; JMF Johnson; TE Schumacher; M Vigil & WE Riedell. 2008. Change in surface soil carbon under rotated corn in eastern South Dakota. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 1738-1744.
- Quiroga, A; P Carfagno; MJ Eiza & R Michelena. 2007. Inclusión de cultivos de cobertura bajo agricultura de secano en la Región Semiárida Pampeana. Jornadas de Cultivos de Cobertura- 28 y 29 de Septiembre de 2007, General Villegas y General Pico.
- Restovich, SB; MC Sasal; AB Irizar; F Rimatori; ML Darder & AE Andriulo. 2005. Rotación con maíz vs monocultivo de soja: efecto sobre los stocks de carbono y nitrógeno edáficos. VIII Congreso Nacional de Maíz. Rosario, Santa Fe, Argentina. 208 pp.
- Restovich, S; A Andriulo; C Sasal; A Irizar; F Rimatori; M Darder & L Hanuch. 2006. Absorción de agua y nitrógeno edáficos de diferentes cultivos de cobertura. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy, Argentina.
- Restovich, SB; AE Andriulo & SI Portela. 2012. Introduction of cover crops in a maize-soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics. *Field Crops Res.* 128: 62-70.
- Richards, LA. 1947. Pressure-membrane apparatus-construction and use. *Agric. Eng.* 28(10): 451-454.
- Sainju UM; BP Singh & WF Whitehead. 1998. Cover crop root distribution and its effects on soil nitrogen cycling. *Agron. J.* 90: 511-518.
- Unger, PW & MF Vigil. 1998. Cover crops effects on soil water relationships. *J. Soil Water Conserv.* 53: 200-2007.

