

CULTIVOS DE COBERTURA: EFECTO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE AZUFRE EN SOJA

WALTER DANIEL CARCIOCHI*¹⁻², LUCAS EZEQUIEL CONTRERAS¹,
CECILIA CRESPO¹⁻², PABLO ANDRÉS BARBIERI²⁻³

Recibido: 13/5/2019

Recibido con revisiones: 19/7/2019

Aceptado: 6/9/2019

RESUMEN

La elección de la especie de cultivo de cobertura (CC) a emplear puede afectar la disponibilidad de azufre (S) para el cultivo de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) posterior. Así, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de avena (*Avena sativa* L.) y vicia (*Vicia villosa* Roth.) como CC y la fertilización azufrada sobre algunos parámetros que definen la disponibilidad de S y el rendimiento en el cultivo de soja posterior. Se realizaron tres ensayos de campo en distintas zonas del Sudeste Bonaerense donde se evaluó la combinación de tres niveles de CC (avena, vicia y un testigo sin CC) con dos niveles de fertilización azufrada en la soja (0 y 15 kg S ha⁻¹). Se determinó el contenido de S-SO₄⁻² (0-60 cm) en el suelo a la siembra de la soja, el índice de verdor (IV) a inicio de floración (R1) y el rendimiento en grano. Los principales resultados del trabajo son: i) los CC acumularon entre 7 y 17 kg S ha⁻¹, logrando reducir las pérdidas de S por lixiviación durante el barbecho invernal, ii) la vicia incrementó en promedio 28 kg S ha⁻¹ su disponibilidad en el suelo a la siembra de la soja, respecto a la avena y al testigo, iii) el IV de la soja fue menor con antecesor avena que con vicia y el testigo, iv) no hubo respuesta en rendimiento a la fertilización con S, v) en dos de los tres sitios el CC de vicia redujo el rendimiento en grano de la soja, posiblemente por un efecto negativo sobre la nodulación y fijación biológica de nitrógeno, lo cual deberá ser corroborado en futuros trabajos.

Palabras clave: Avena, vicia, sulfato, índice de verdor, rendimiento

COVER CROPS: EFFECT ON SULFUR AVAILABILITY IN SOYBEAN

ABSTRACT

Selecting the cover crop (CC) specie may affect sulfur (S) availability for the succeeding soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) crop. Thus, the objective of this work was to evaluate the effect of oat (*Avena sativa* L.) and vetch (*Vicia villosa* Roth.) as CC and S fertilization on some parameters that define S availability and yield in the succeeding soybean. Three field experiments were conducted in different areas of southeastern Buenos Aires province, where the combination of three levels of CC (oats, vetch, and a control without CC) with two levels of S fertilization (0 and 15 kg S ha⁻¹) was evaluated in soybean. Determinations included: SO₄⁻²-S content in soil (0-60 cm) at soybean sowing, greenness index (IV) at the beginning of flowering (R1), and seed yield. The main results were: i) CC accumulated between 7 and 17 kg S ha⁻¹, allowing reductions of S losses by leaching during the winter fallow, ii) vetch increased S availability in the soil at soybean planting by 28 kg S ha⁻¹, compared to oat and the control, iii) soybean IV was lower when preceded by oat compared to vetch and the control, iv) there was no yield response to S fertilization, v) in two of the three sites vetch reduced soybean seed yield, possibly due to a negative effect on nodulation and biological nitrogen fixation, which should be tested in future works.

Key words: Oat, vetch, sulfate, greenness index, yield

1 Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata

2 CONICET

3 EEA INTA Balcarce

*Autor de contacto: waltercarciochi@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

Los cultivos de cobertura (CC) son aquellos que se siembran entre dos cultivos de cosecha y no son incorporados al suelo, pastoreados, ni cosechados. En la actualidad, el empleo de los CC va en aumento, ya que pueden proveer muchos servicios dentro de los sistemas agrícolas, brindando diferentes beneficios que hacen a su inclusión en las rotaciones (Bertolotto & Marzetti, 2017). Uno de los motivos por los cuales se emplean los CC es el ciclado de nutrientes. Durante el periodo de barbecho que tiene lugar entre dos cultivos de verano, suele existir un exceso de agua que puede perderse por percolación o escurrimiento. La lixiviación de nutrientes lábiles como el nitrógeno (N) y azufre (S) ocurre principalmente en estos meses de otoño e invierno (Paul & Zebarth, 1997; Eriksen & Thorup-Kristensen, 2002). Se ha demostrado que cultivos creciendo durante dichas épocas del año pueden absorber N en forma de nitrato (N-NO_3^-) y S en forma de sulfato (S-SO_4^{2-}) de la zona radical, incorporándolo a su biomasa y reduciendo así sus pérdidas por lavado (Thorup-Kristensen & Nielsen, 1998; Eriksen & Thorup-Kristensen, 2002; Eriksen *et al.*, 2004, Martínez *et al.*, 2013). Así, los CC pueden capturar los nutrientes lábiles durante los meses donde ocurren las mayores pérdidas, pudiendo liberarlos luego de su descomposición durante la época de crecimiento del cultivo de cosecha siguiente.

El aporte de nutrientes que hagan los CC al cultivo de cosecha siguiente va a depender, entre otras causas, de la especie seleccionada como CC. Así, la acumulación de biomasa de cada especie y la calidad de sus residuos, determinarán la velocidad de su descomposición y la cantidad de nutrientes retenidos en sus tejidos que serán liberados. Uno de los indicadores de calidad de los residuos es su relación carbono (C)/N (Restovich *et al.*, 2012). Las leguminosas, como la vicia (*Vicia villosa* Roth.), presentan menores relaciones C/N, que los CC de gramíneas, como la avena (*Avena sativa* L.) (Duval *et al.*, 2017). Así, numerosos trabajos han evaluado el aporte de N desde diversos CC, reportando una mayor disponibilidad del nutriente con leguminosas que con gramíneas, pudiendo generar estas últimas inmovilización de N, disminuyendo su disponibilidad para el cul-

tivo posterior (Vyn *et al.*, 2000; Restovich *et al.*, 2012). Poco se sabe del efecto de los CC sobre la disponibilidad de S para el cultivo de cosecha posterior. Sin embargo, uno de los pocos trabajos en el tema indicó que residuos de CC con menor relación C/N y C/S, al ser incorporados al suelo sufren una rápida descomposición y liberación de S que queda disponible para el cultivo siguiente (Eriksen & Thorup-Kristensen, 2002). En base a esto, y tal como se reportó para N, es esperable que los CC de leguminosas incrementen la disponibilidad de S para el cultivo posterior, mientras que los de gramíneas la disminuyan.

La deficiencia de S en suelos de distintas áreas del mundo se ha incrementado en el último tiempo (Lucheta & Lambais, 2012). En comparación con fósforo (P) y N, la fertilización con S en los suelos agrícolas ha recibido poca atención. Sin embargo, la intensificación en las rotaciones de cultivos, la falta de rotación con pasturas, la caída en el contenido de materia orgánica (MO) de los suelos y la reducción en las deposiciones atmosféricas de S han generado disminuciones en el pool de S de algunos suelos, incrementando la magnitud y frecuencia de su deficiencia (Scherer, 2009). Por consiguiente, en la Región Pampeana Argentina, se han observado respuestas a la fertilización azufrada en trigo (*Triticum aestivum* L.) (Reussi Calvo *et al.*, 2011; Eriksen *et al.*, 2018), maíz (*Zea mays* L.) (Pagani *et al.*, 2009; Carciochi *et al.*, 2016) y soja (*Glycine max* (L.) Merr.) (Salvagiotti *et al.*, 2012; Divito *et al.*, 2015).

La soja es la leguminosa más importante cultivada mundialmente, proporcionando más de la mitad de los aceites vegetales al mundo y dos tercios de la harina de proteína (Pagano & Miransari, 2016). Recientemente se han registrado deficiencias en S en las principales áreas productoras de soja en el mundo (Gutierrez Boem *et al.*, 2007; Salvagiotti *et al.*, 2012; Kaiser & Kim, 2013; Pias *et al.*, 2019). Así, para la Región Pampeana, se han reportado respuestas en rendimiento a la fertilización azufrada que variaron entre 13 y 40% (Gutierrez Boem *et al.*, 2007; Divito *et al.*, 2015). Si bien la disponibilidad de S-SO_4^{2-} en el suelo a la siembra del cultivo no siempre logra un diagnóstico de S adecuado, Echeverría *et al.* (2011) reportaron un umbral de 40 kg S

ha⁻¹ (0-60 cm) por encima del cual no habría respuesta al agregado de S en soja de segunda. Mas aún, Divito *et al.* (2015) reportaron mayores deficiencias y respuestas al agregado de S en cultivos de soja de segunda, respecto de los de primera. Dichos autores atribuyeron la mayor deficiencia en la soja de segunda a la remoción de S-SO₄⁻² del suelo por parte del cultivo de invierno anterior, y a la inmovilización de S promovida por los residuos de dicho cultivo, generalmente gramíneas como trigo o cebada (*Hordeum vulgare* L.) (Divito *et al.*, 2015). Por lo tanto, es de esperarse que el uso de gramíneas como CC afecte negativamente la disponibilidad de S para soja. Sin embargo, es escasa la información acerca de la respuesta al agregado de S en cultivos de soja posteriores a diversos CC.

El objetivo del presente trabajo es evaluar el efecto de avena y vicia sobre la disponibilidad de S-SO₄⁻² en el suelo, y su impacto sobre el estatus azufrado y la respuesta en rendimiento a S en el cultivo de soja posterior.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios, tratamientos y diseño experimental

Se realizaron tres ensayos en distintos sitios del Sudeste Bonaerense, Provincia de Buenos Aires, Argentina en el periodo comprendido entre mayo de 2017 y junio de 2018 (**Tabla 1**). El primer ensayo se ubicó en el establecimiento Santo Domingo, partido de Lobería; el segundo en el establecimiento El Silencio, partido de General Pueyrredón; y el tercero se ubicó en el estableci-

miento San Lorenzo, partido de Lobería, Provincia de Buenos Aires, Argentina. El tipo de suelo fue Argiudol típico en los tres sitios. El diseño experimental de los ensayos fue en bloques completos aleatorizados con un arreglo de tratamientos en parcelas divididas con tres repeticiones. A la parcela principal se le asignó el factor CC con tres niveles: i) avena, ii) vicia, y ii) testigo (sin CC). A las sub-parcelas se les asignó el factor fertilización azufrada con dos niveles: i) 0 kg S ha⁻¹ y ii) 15 kg S ha⁻¹, asegurando una dosis de suficiencia para la zona (Divito *et al.*, 2015). Cada unidad experimental (sub-parcela) midió 3 x 10 m.

Los CC fueron sembrados a principio de mayo del 2017 bajo siembra directa, empleando una densidad de siembra de 35-37 kg ha⁻¹ para la vicia y 80-120 kg ha⁻¹ para la avena. Por su parte, el tratamiento testigo se mantuvo libre de malezas mediante el control químico de las mismas. Durante el mes de octubre se procedió a la supresión o secado químico de los CC y 30-45 días posteriores se realizó la siembra del cultivo de soja (**Tabla 1**). A la emergencia del mismo se fertilizaron todas las parcelas con 20 kg P ha⁻¹ bajo la forma de superfosfato triple (20% P) al voleo, y a las parcelas que recibieron el tratamiento de fertilización azufrada se les aplicaron 15 kg S ha⁻¹ bajo la forma de sulfato de calcio granulado (18% S) al voleo. Información adicional del manejo del cultivo de soja se puede observar en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Ubicación, características edáficas (clase textural, pH, materia orgánica (MO) y nitrógeno mineralizado en anaerobiosis (Nan)) y manejo del cultivo (fecha de secado de los cultivos de cobertura (CC), fecha y densidad de siembra y distancia entre surcos del cultivo de soja) de los tres experimentos.

Table 1. Location, edaphic characteristics (textural class, pH, organic matter (MO) and nitrogen mineralized in anaerobiosis (Nan)) and crop management (cover crop (CC) killing date, sowing date, plant density and row spacing) in the three experiments.

Sitio	Ubicación	Características edáficas				Manejo del cultivo			
		Clase textural	pH	MO (g kg ⁻¹)	Nan (mg kg ⁻¹)	Fecha de secado CC	Fecha de siembra soja	Densidad desiembra (semillas ha ⁻¹)	Distancia entre surcos (m)
1	37,91 S; 58,60 O	Franco	5,9	55	70,4	22-oct	17-nov	380.000	0,21
2	37,88 S; 57,84 O	Franco arenoso	5,7	44	54,5	7-oct	22-nov	300.000	0,21
3	38,49 S; 58,71 O	Franco arenoso	5,5	53	67,7	23-oct	5-dic	420.000	0,35

Determinaciones en los CC

Previo al secado químico de los CC de avena y vicia (**Tabla 1**), se determinó la acumulación de biomasa de los mismos. Para ello, se tomaron de cada parcela (tres repeticiones) muestras al azar de 2 m lineales de avena y de una superficie de 0,25 m² para vicia, cortando al ras del suelo las plantas. Las muestras fueron secadas en estufa (60°C), pesadas y molidas para su posterior determinación de la concentración de S por el método Dumas, mediante un analizador LECO TruSpec S (LECO, St. Joseph, MI, USA). La relación C/S se calculó considerando una concentración constante de C del 44% (Duval *et al.*, 2017).

Determinaciones en el suelo

Al momento de la siembra de los CC se tomaron a 20 cm de profundidad muestras compuestas de suelo (20 piques) en cada uno de los bloques de los ensayos. Las muestras fueron secadas en estufa a 30°C, molidas y tamizadas por 2 mm. A partir de dichas muestras se realizó la determinación de MO (Walkley & Black, 1934), pH (1:2,5), textura (Bouyoucos, 1962) y N mineralizado en incubación anaeróbica (Nan) (Keeney, 1982), con la finalidad de caracterizar cada uno de los sitios.

A la siembra del cultivo de soja, se tomaron muestras compuestas de suelo (20 piques) en los estratos 0-20 y 20-60 cm, en cada uno de los bloques de las parcelas principales. Las muestras fueron secadas en estufa a 30°C, molidas y tamizadas por 2 mm. A partir de dichas muestras se determinó el contenido de S-SO₄⁻² utilizando como extractante una solución de Ca(H₂PO₄)₂ (Islam & Bhuiyan, 1998) y cuantificando posteriormente el SO₄⁻² por turbidimetría con BaCl y Tween 80 como estabilizador (Johnson, 1987). Sobre dichas muestras también se determinó el contenido de N-NO₃⁻ (0-60 cm) mediante el método del ácido fenoldisulfónico (Keeney & Nelson, 1982). Para convertir la concentración de S-SO₄⁻² y N-NO₃⁻ de mg kg⁻¹ a kg ha⁻¹ se determinó la densidad aparente de cada sitio mediante el método del muestreador tubular (Agostini *et al.*, 2014).

Determinaciones en el cultivo de soja

En el estadio de inicio de floración de la soja (R1; Fehr & Caviness, 1977) se determinó el IV con el medidor de clorofila Minolta SPAD 502 (Konica Minolta, Ramsey, NJ). El valor IV resultó del promedio de 20 lecturas efectuadas sobre el foliolo central de la última hoja desarrollada de las plantas.

En el estadio de madurez fisiológica (R8) se cosecharon manualmente las plantas presentes en 2 m lineales de los 3 surcos centrales de cada parcela y se trillaron en una trilladora estacionaria. El rendimiento en grano se expresó con un contenido de humedad de 135 g kg⁻¹.

Variables agrometeorológicas

Para el análisis meteorológico se obtuvo información de precipitaciones, evapotranspiración de referencia y temperatura media diaria de los registros diarios del Servicio Agrometeorológico del INTA y de estaciones meteorológicas ubicadas en los establecimientos donde se realizaron los ensayos. Se realizaron balances hídricos para cada sitio y se calcularon los déficits hídricos como la diferencia entre la evapotranspiración máxima y la real del cultivo (Della Maggiora *et al.*, 2002).

Análisis estadístico

Se realizaron análisis de la varianza utilizando el procedimiento ANOVA incluido en el programa estadístico R (R Core Team, 2018). Cuando las diferencias entre tratamientos fueron significativas se empleó el test de la diferencia mínima significativa (LSD), con un nivel de significancia de 0,05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características meteorológicas de la campaña

Las temperaturas medias mensuales durante la campaña fueron muy similares a la media histórica en los tres sitios, permitiendo un adecuado crecimiento y desarrollo de los CC y del cultivo de soja (datos no mostrados). En cuanto a las precipitaciones, se observó que fueron en promedio 118 mm superiores a la media histórica du-

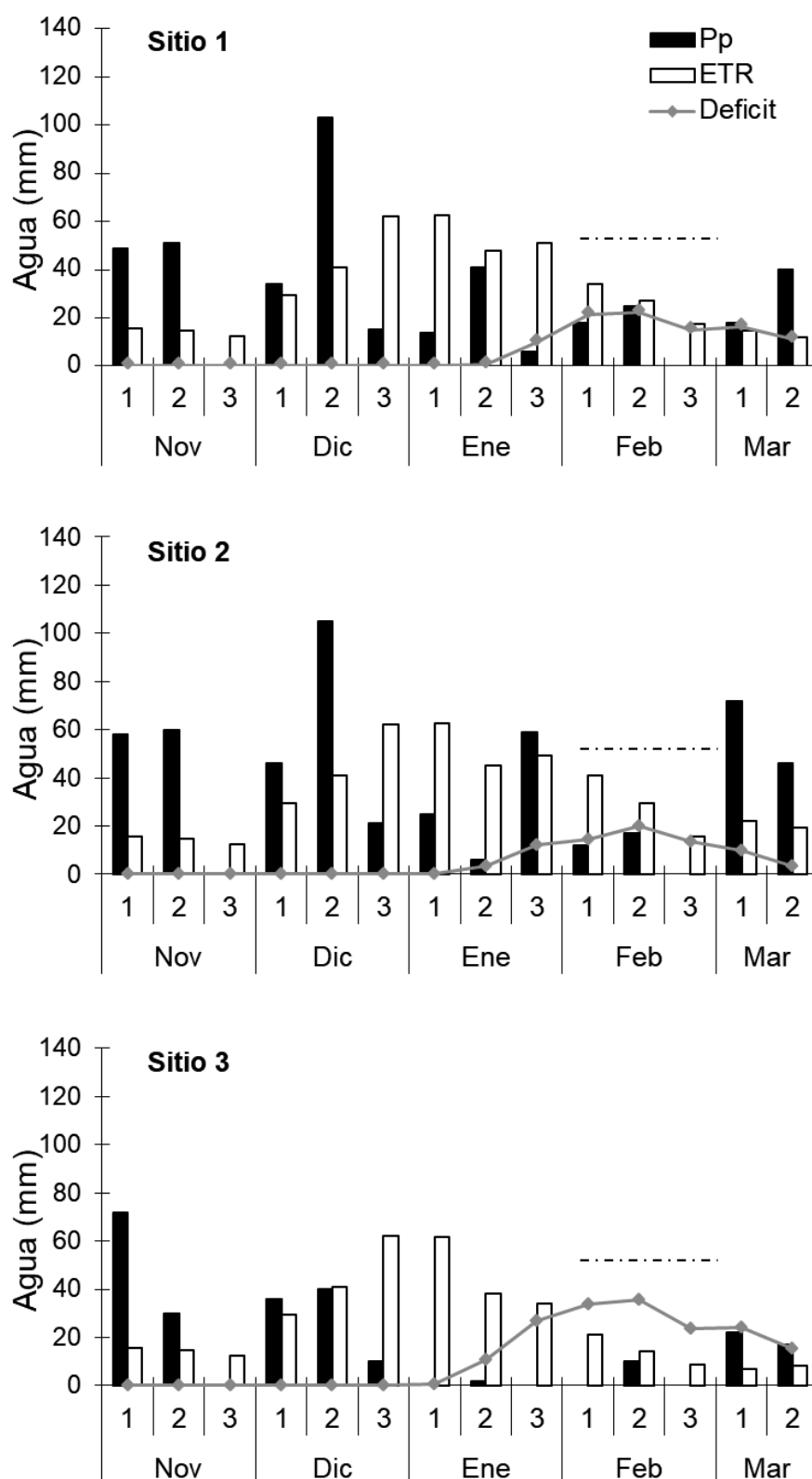


Figura 1. Precipitaciones (Pp), evapotranspiración real (ETR) y déficit hídrico decádico durante el ciclo del cultivo de soja. La línea de puntos indica el periodo crítico del cultivo.

Figure 1. Precipitation (Pp), real evapotranspiration (ETR), and water deficit for 10-day periods during soybean growing season. Dotted line indicates the crop critical period.

rante el ciclo de los CC para los tres sitios (466 mm en el sitio 1, 445 mm en el sitio 2 y 474 mm en el sitio 3). Por su parte, para el cultivo de soja se observó que en los tres sitios hubo un déficit hídrico desde fines de enero a marzo (**Figura 1**), más marcado en el sitio 3. Dichas deficiencias pueden haber tenido un efecto negativo sobre el rendimiento de la soja, sobre todo siendo que ocurrieron durante el periodo crítico de definición del rendimiento del cultivo (R3 a R6) (Andrade, 1995).

Las características edáficas (textura, pH, MO y Nan) de los tres sitios (**Tabla 1**) son semejantes a los valores reportados por Sainz Rozas *et al.* (2011) y Reussi Calvo *et al.* (2014) para la zona bajo estudio. En base a los valores de MO y Nan observados en cada sitio, en particular en los sitios 1 y 3, es esperable un importante aporte de S por mineralización (Carciochi *et al.*, 2018).

Características de los CC

El CC de avena acumuló mayor biomasa que la vicia en los sitios 1 (+8,3 Mg ha⁻¹) y 3 (+5,2 Mg ha⁻¹) (**Tabla 2**). Generalmente, por el mayor crecimiento invernal, las gramíneas duplican en producción de biomasa a las leguminosas (Restovich *et al.*, 2012; Duval *et al.*, 2017). Sin embargo, en el sitio 2, el uso de herbicidas para el control de malezas afectó negativamente el crecimiento

de la avena, por lo que no hubo diferencias entre CC en la acumulación de biomasa.

En promedio entre los tres sitios, la concentración de S en la biomasa aérea del CC de vicia fue un 75% superior a la de la avena (2,5 vs 1,4 g kg⁻¹ para vicia y avena, respectivamente) (**Tabla 2**). En el sitio 1 la acumulación de S en la biomasa aérea fue ~10 kg ha⁻¹ superior en la avena respecto a la vicia, mientras que en los sitios 2 y 3 no hubo diferencias entre CC (**Tabla 2**). De igual modo, Duval *et al.* (2017) reportaron similar acumulación de S entre vicia y avena. Esto está explicado por la menor concentración de S en gramíneas que es compensada con una mayor producción de biomasa, mientras que lo contrario ocurre con las leguminosas.

En los tres sitios, la relación C/S difirió entre CC, siendo en promedio de 320/1 en avena y 169/1 en vicia (**Tabla 2**). Resultados similares fueron reportados por Whitehead (2000), quien observó relaciones C/S de 320/1 y 270/1 para residuos de gramíneas y leguminosas, respectivamente.

Disponibilidad de S-SO₄⁻² en suelo a la siembra de la soja

En los sitios 2 y 3, el contenido de S-SO₄⁻² en los primeros 20 cm de profundidad del suelo fue 107% superior con antecesor vicia respecto a avena y el testigo (**Figura 2**). Esto pudo deberse a que parte del S acumulado en los tejidos del cultivo de vicia fue liberado (mineralizado) para el momento de la me-

dición, por una rápida descomposición luego del secado químico. En línea con esto, se ha reportado que entre el 40 y 50% de los residuos de vicia pueden ser descompuestos luego de 30 días de su secado (de Sá Pereira *et al.*, 2012). Por su parte, en el sitio 1, el contenido de S-SO₄⁻² en el suelo (0 – 20 cm) del testigo no se diferenció del antecesor vicia y ambos tratamientos mostraron un contenido 52% superior al del antecesor avena (**Figura 2**). El residuo de avena, con mayor relación C/S (**Tabla 2**), pudo haber inmovilizado parte del S-SO₄⁻² del suelo (Eriksen *et al.*, 2004) y al momento de la medición (30 a 45 días posteriores a su secado químico) el contenido en el suelo fue menor. Por su parte, la ausencia de diferencia entre el testigo y la vicia puede deberse a movimiento del S liberado desde el residuo de vicia hacia zonas más profundas del perfil del suelo (> 20 cm) (**Figura 2**).

En el estrato inferior del perfil del suelo (20-60 cm) el contenido de S-SO₄⁻² a la siembra de la soja fue superior con el antecesor vicia respecto al testigo y al antecesor avena, en los tres sitios (**Figura 2**). Esto pudo deberse, como se dijo anteriormente, a que los residuos de vicia se descompusieron rápidamente luego de su secado químico, liberando el S absorbido. A su vez, parte de ese S liberado pudo provenir de la descomposición de las raíces, aunque dicho proceso no se haya cuantificado en el presente trabajo.

Finalmente, en el total de la profundidad evaluada (0-60 cm) se observó en los tres sitios que la disponibilidad de S-SO₄⁻² a la siembra de la

Tabla 2. Biomasa aérea, concentración de azufre (S) en la biomasa, S acumulado en la biomasa y relación carbono (C) / S de los diferentes cultivos de cobertura (CC) para los tres sitios experimentales. Los valores entre paréntesis indican error estándar. Letras iguales entre CC para cada sitio indican diferencias no significativas (p>0,05) según test LSD.

Table 2. Aboveground biomass, sulfur (S) concentration in biomass, S accumulated in biomass, and carbon (C) / S ratio in different cover crops (CC) and three experimental sites. Values in parentheses indicate standard error. Same letter between CC in each site indicate no difference (p>0,05) using LSD test.

Sitio	CC	Biomasa (Mg ha ⁻¹)	Concentración S (g kg ⁻¹)	S acumulado (kg ha ⁻¹)	C/S
1	Avena	11,3 (0,3) a	1,5 (0,07) b	17,1 (0,5) a	285,2 (14,6) a
	Vicia	3,0 (0,1) b	2,5 (0,11) a	7,4 (0,3) b	175,9 (9,1) b
2	Avena	5,1 (0,3) a	1,7 (0,11) b	8,7 (1,0) a	256,8 (19,1) a
	Vicia	5,1 (0,5) a	2,7 (0,08) a	13,8 (1,7) a	159,7 (5,3) b
3	Avena	7,9 (0,6) a	1,0 (0,01) b	8,2 (0,6) a	417,9 (4,1) a
	Vicia	2,7 (0,2) b	2,5 (0,14) a	7,0 (0,8) a	171,3 (11,52) b

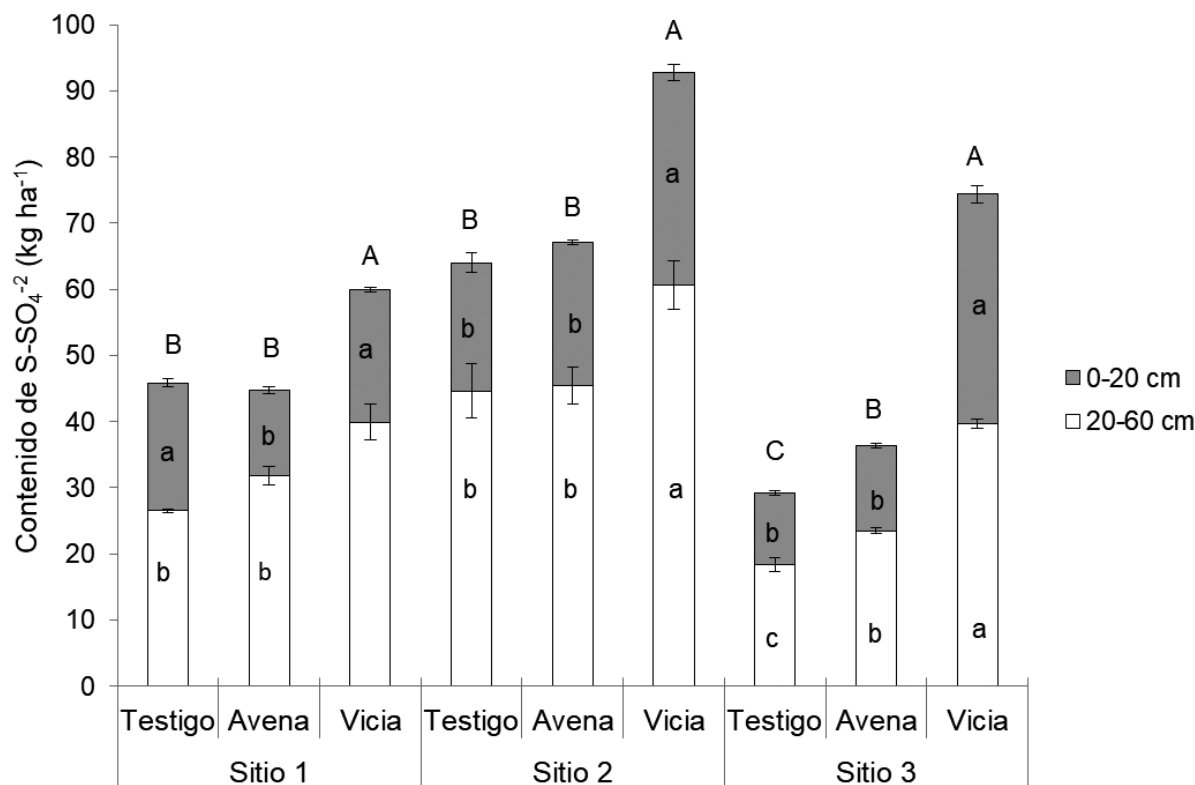


Figura 2. Contenido de S-SO₄²⁻ en el suelo a la siembra del cultivo de soja en 0-20, 20-60 y 0-60 cm de profundidad para los tratamientos testigo sin cultivo de cobertura, avena y vicia. Para cada sitio y profundidad, letras iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos según test LSD ($p < 0,05$). Las barras verticales en cada columna indican error estándar de la media.

Figure 2. Soil SO₄²⁻S content at soybean sowing 0-20, 20-60, and 0-60 cm depth for the treatments control without cover crop, oat, and hairy vetch. For each site, equal letters indicate no significant differences among treatment according to LSD test ($p < 0.05$). Vertical bars in each column indicate standard error of the mean.

soja fue en promedio 28 kg S ha⁻¹ (58%) superior con antecesor vicia respecto de avena y el testigo. Este valor supera el contenido de S cuantificado en la biomasa aérea de los residuos de dicho CC. Por lo tanto, parte del mencionado incremento puede deberse a la mineralización desde las raíces de los CC, aunque también es probable que la baja relación C/S de los residuos de vicia haya favorecido la mineralización de S de la MO edáfica debido a un efecto cebador o “priming”, tal como ha sido reportado para N (Kuzuyakov *et al.*, 2000).

Las diferencias en disponibilidad de S-SO₄²⁻ en el suelo entre CC pueden deberse a la relación C/S de sus residuos, ya que dicha variable afecta la mineralización de S. En línea con esto, Eriksen (2009) indicó que la descomposición de residuos con una relación C/S mayor a 400 generalmente resulta en la inmovilización de S, mientras que con una relación C/S menor a 200, hay minera-

lización neta. Tal como puede observarse en la **Tabla 2**, la relación C/S en el residuo de vicia fue en todos los sitios menor a 200, indicando mineralización de S desde los residuos. Por otra parte, la acumulación de S en la biomasa del CC también afectará la cantidad del nutriente que estará disponible mediante mineralización para el cultivo de cosecha posterior. Así, resulta necesario en futuros trabajos considerar ambas variables (cantidad y calidad del residuo) para ajustar modelos de mineralización de S desde los CC.

Hasta el momento no se ha encontrado en la bibliografía trabajos que hayan analizado el contenido de S-SO₄²⁻ en el suelo luego de diferentes CC de gramíneas y leguminosas. Sin embargo, Eriksen & Thorup-Kristensen (2002) reportaron incrementos de S-SO₄²⁻ en los primeros 50 cm del suelo luego de la incorporación de CC de crucíferas con relaciones C/S entre 52 y 71. Debido a que la dinámica de N y S en el sistema suelo-

planta es similar, los resultados del presente trabajo pueden ser comparados a aquellos reportados para el N en forma de nitrato (N-NO_3^-). Así, Restovich *et al.* (2012) y Crespo (2018) reportaron que el contenido de N-NO_3^- a la siembra del cultivo de cosecha fue superior cuando se incluyó vicia como CC.

Determinación del IV en el cultivo de soja

No se observaron diferencias significativas en el IV entre tratamientos de fertilización con S ($p = 0,82$), ni efecto de interacción entre los factores CC y fertilización con S ($0,95$). Sin embargo, hubo diferencias en IV entre los distintos tratamientos de CC (**Figura 3**). En los tres sitios, la soja sembrada sobre el antecesor avena, registró valores de IV menores que los medidos sobre el testigo y vicia. La alta relación C/S (**Tabla 2**) y por consiguiente la alta relación C/nutriente, y la elevada cantidad de biomasa (**Tabla 2**) del residuo de avena, pudo haber provocado inmovilización de diversos nutrientes, causando un menor IV en este tratamiento, comparado con el testigo y el antecesor vicia.

Rendimiento en grano

No se observaron diferencias significativas en el rendimiento de la soja entre tratamientos de fertilización con S ($p = 0,94$), ni efecto de interacción entre los factores CC y fertilización azufrada ($p = 0,56$). Si bien se observaron diferencias en la disponibilidad de S-SO_4^{2-} entre antecesores a la siembra de la soja, es probable que dichas diferencias no se hayan manifestado en rendimiento porque: i) en los tres sitios las precipitaciones superaron a la evapotranspiración durante los meses de noviembre y diciembre (**Figura 1**), por lo que pudo haber pérdidas de S por lavado, quitando los efectos del antecesor y ii) el S aportado por mineralización desde la MO pudo haber sido suficiente para cubrir el requerimiento de S de la soja. Al respecto, los suelos donde se llevaron a cabo las experiencias presentaron valores de Nan elevados, superiores a los 54 mg kg^{-1} (**Tabla 1**) considerados como umbral para el diagnóstico de la disponibilidad de S en maíz (Carciochi *et al.*, 2016). Así, es probable que el aporte de S por mineralización sea una de las causas de ausencia de respuesta a la fertilización azufrada.

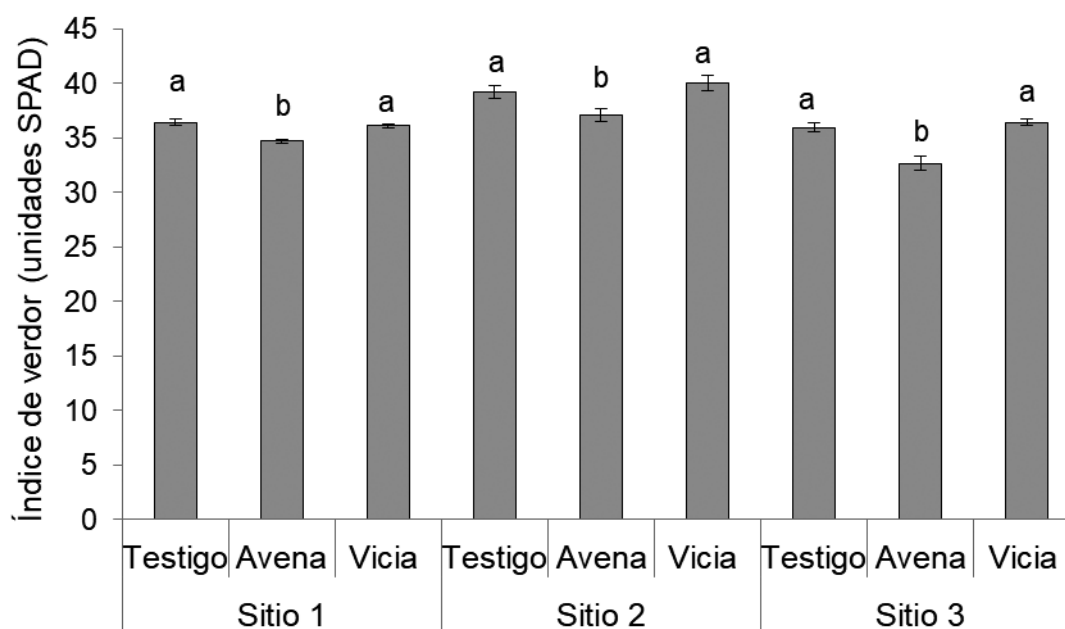


Figura 3. Índice de verdor (IV) en soja al inicio de floración (R1; Fehr y Caviness, 1977), con antecesor testigo sin cultivo de cobertura, avena y vicia. Para cada sitio, letras iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos según test LSD ($p < 0,05$). Las barras verticales en cada columna indican error estándar de la media.

Figure 3. Greenness index (IV) in soybean at the beginning of flowering (R1; Fehr y Caviness, 1977) preceded by a control without cover crop, oat, and hairy vetch. For each site, equal letters indicate no significant differences among treatment according to LSD test ($p < 0.05$). Vertical bars in each column indicate standard error of the mean.

En los tres sitios hubo diferencias en el rendimiento del cultivo de soja sembrada sobre los distintos antecesores (**Figura 4**). En los sitios 1 y 2, el rendimiento de la soja sembrada sobre avena fue mayor que el sembrado sobre vicia, e intermedio en el testigo. La información disponible no permite determinar con certeza los motivos de dichas diferencias ente tratamientos, sin embargo, surgen algunas posibles hipótesis al respecto: i) los CC afectaron diferencialmente la dinámica de agua en el sistema, y ii) los CC alteraron la nodulación, fijación biológica de N y propiedades químicas del suelo.

Respecto al efecto de los CC sobre la dinámica hídrica, es posible que el CC de avena, por su mayor producción de biomasa y su menor velocidad de descomposición, haya generado una mayor y más prolongada cobertura de la superficie del suelo lo que redujo las pérdidas de humedad por evaporación, incrementando la disponibilidad de agua para la soja. Dicho efecto pudo favorecer el rendimiento de la soja, particularmente bajo las condiciones de déficit hídrico observadas en la campaña bajo estudio (**Figura 1**). Resultados similares a los planteados fueron observados en el sur de Córdoba, donde el uso de centeno como CC favoreció el almacenaje de agua en el suelo,

incluso en los momentos de mayor evapotranspiración durante el cultivo de soja (Morla *et al.*, 2015).

Por otro lado, y en línea con lo planteado en la hipótesis ii, es posible que los CC hayan afectado la dinámica de N del sistema, impactando sobre el rendimiento. Así, la mayor disponibilidad de $N-NO_3^-$ en el suelo a la siembra de la soja con CC de vicia (promedio entre sitios de 35, 52 y 71 kg N ha⁻¹ para avena, testigo y vicia, respectivamente) pudo haber disminuido la nodulación y por consiguiente la capacidad de fijación biológica de N (Navarro *et al.*, 2015; Xia *et al.*, 2017). Dicha situación genera una mayor dependencia de la disponibilidad de N edáfico para la nutrición del cultivo. Jani *et al.* (2016) y Jahanzad *et al.* (2016) reportaron que los CC de leguminosa mineralizaron más del 60% de su N en las primeras 4 a 6 semanas. Así, la rápida descomposición del residuo de vicia pudo haber aportado N durante los primeros estadios de la soja, lo cual explica que el IV determinado en R1 no haya detectado un posible problema en la nodulación (**Figura 3**). Sin embargo, es probable que a partir del periodo crítico de la soja (entre R3 y R6; Andrade, 1995) la disponibilidad de N en el suelo con vicia haya disminuido por menores aportes del residuo

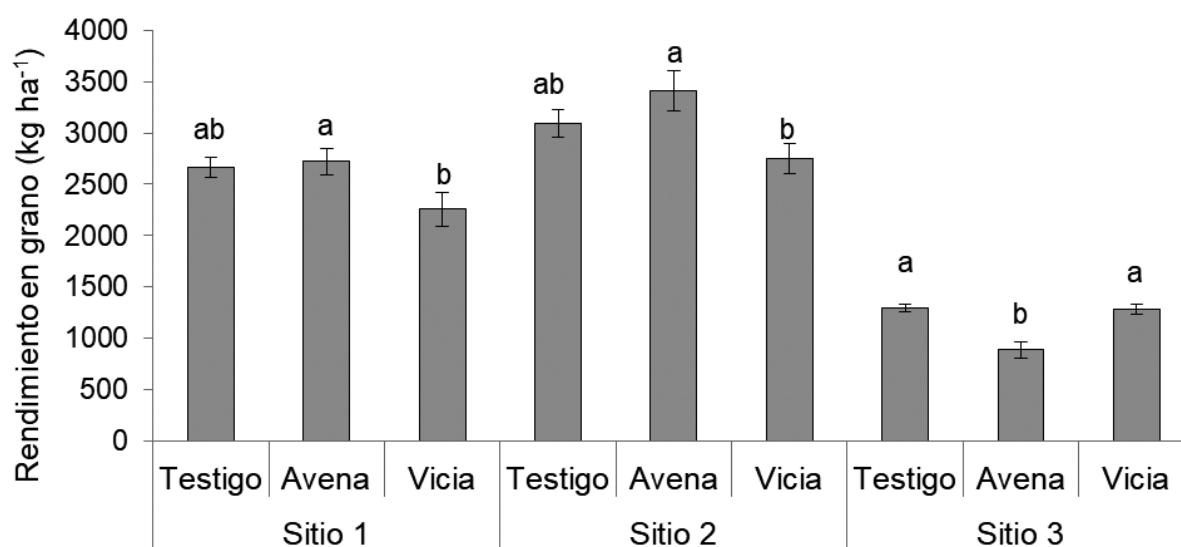


Figura 4. Rendimiento en grano de soja con antecesor testigo sin cultivo de cobertura, avena y vicia. Para cada sitio, letras iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos según test LSD ($p < 0,05$). Las barras verticales en cada columna indican error estándar de la media

Figure 4. Seed yield of soybean preceded by a control without cover crop, oat, and hairy vetch. For each site, equal letters indicate no significant differences among treatment according to LSD test ($p < 0.05$). Vertical bars in each column indicate standard error of the mean.

en ese momento. De forma opuesta, es probable que la menor disponibilidad de N-NO_3^- en el suelo con CC de avena haya posibilitado una mayor nodulación que con vicia (Klein, 2013). Relacionado a esto, Siczek & Lipiec (2011) indicaron que la aplicación de residuos de trigo (comparable a la de avena) disminuyó la disponibilidad de N-NO_3^- del suelo e incrementó el peso y tamaño de los nódulos y la actividad nitrogenasa de estos. Además, la menor velocidad de mineralización de N del residuo de avena (Klein, 2013; Siever & Cook, 2018), puede haber aportado este nutriente en estadios tardíos del cultivo (a partir de R5.5) cuando disminuye la fijación biológica de N (Bethlenfalvay & Phillips, 1977). En línea con esto, Kitou & Yoshida (1994) reportaron que la incorporación de residuos de distintas especies vegetales incrementó el crecimiento de la soja a través de aumentos en la nodulación y fijación de N en estadios tempranos, y a través de mejoras en la fertilidad del suelo en estadios avanzados. Debido a esto, los valores de IV medidos en R1 no fueron un buen indicador del rendimiento logrado a madurez fisiológica.

En el sitio 3 se obtuvieron valores de rendimiento del cultivo de soja muy bajos, lo cual puede deberse al déficit hídrico ocurrido durante el periodo crítico de la soja (**Figura 1**). En este sitio, el efecto de los CC sobre el rendimiento de la soja fue distinto al de los otros dos sitios (**Figura 4**). Los menores rendimientos observados en el sitio 3 fueron acompañados por menores requerimientos nutricionales, por lo que es probable que el aporte de N proveniente de la mineralización del suelo haya sido suficiente para satisfacer la demanda de este nutriente, quitando el posible efecto de los CC sobre la dinámica de N. A su vez, el menor rendimiento con avena puede deberse al menor stand de plantas observado en este tratamiento, ya que la mayor cobertura ayudó a conservar una mayor humedad del suelo en superficie, favoreciendo el desarrollo de las plagas que produjeron daños y cortes de plántulas al inicio del ciclo del cultivo.

SINTESIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados del presente trabajo demostraron que los CC son una práctica de manejo

eficiente para reducir las pérdidas de S por lixiviación durante los barbechos invernales. La cantidad de S que los CC de vicia y avena acumularon en su biomasa aérea varió entre 7 y 17 kg S ha⁻¹. La mayor velocidad de mineralización de S desde el residuo de vicia, debido a su menor relación C/S, incrementó en promedio 28 kg S ha⁻¹ su disponibilidad en el suelo a la siembra de la soja, respecto al CC de avena y al testigo (barbecho). Si bien en las condiciones del presente trabajo no se observó en ningún sitio deficiencia de S, la cantidad de este nutriente acumulado en los CC puede ser un importante aporte para el cultivo de soja posterior. Así, es esperable que en situaciones de deficiencia de S, la utilización de vicia permita disminuir e incluso evitar el uso de fertilizantes azufrados.

Las distintas especies de CC afectaron diferencialmente el rendimiento en grano, aunque dichas diferencias fueron moderadas y no se debieron a un efecto del S. Así, se hipotetizó que las diferencias observadas entre CC podrían deberse a un efecto sobre la dinámica de agua en el suelo, así como un efecto sobre la nodulación y fijación biológica de N.

Los resultados observados motivan a la realización de futuros trabajos en la temática i) realizados en sitios con deficiencia de S, que evalúen si el mayor aporte de este nutriente por parte del cultivo de vicia impacta en el rendimiento, ii) evaluando la dinámica hídrica en el suelo, en particular en años con precipitaciones inferiores a la media, y iii) analizando detalladamente el efecto de las distintas especies de CC sobre la dinámica de N en el suelo, la nodulación y la fijación biológica de N de la soja.

CONCLUSIONES

El empleo de vicia como CC permitió incrementar la disponibilidad de S-SO_4^{2-} en el suelo a la siembra del cultivo de soja, mientras que, en líneas generales, la avena no afectó dicha variable. Sin embargo, para las condiciones del presente trabajo, las diferencias en disponibilidad de S-SO_4^{2-} en suelo no impactaron en el estatus azufrado (cuantificado mediante el IV) ni en el rendimiento en grano de la soja posterior.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa y el laboratorio de suelos de la EEA INTA Balcarce. Los autores agradecen a G. Divito, G. Berg y personal de los establecimientos Santo Domingo, El Silencio y San Lorenzo.

BIBLIOGRAFÍA

- Agostini, M. de los Á; MG Monterubbianesi; GA Studdert & S Maurette. 2014. Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. *Cienc Suelo* 32: 171–176.
- Andrade, FH. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *F. Crop. Res.* 41: 1–12.
- Bertolotto, M & M Marzetti. 2017. Manejo de malezas problema. *Cultivos de cobertura. AAPRESID.* ISSN N° 2250-5350. 31 p.
- Bethlenfalvay, GJ & DA Phillips. 1977. Ontogenetic Interactions between Photosynthesis and Symbiotic Nitrogen Fixation in Legumes. *Plant Physiol.* 60: 419–421.
- Bouyoucos, G. 1962. Hydrometer method for making particle size analysis of soils. *Agron J.* 54:464-465
- Carciochi, WD; N Wyngaard; GA Divito; M Cabrera; NI Reussi Calvo & HE Echeverría. 2016. Diagnosis of sulfur availability for corn based on soil analysis. *Biol Fert Soils.* 52: 917-926.
- Carciochi, WD; N Wyngaard; GA Divito; M Cabrera; NI Reussi Calvo & HE Echeverría. 2018. A comparison of indexes to estimate corn S uptake and S mineralization in the field. *Biol Fert Soils.* 54: 349-362.
- Crespo, C; GF Dominguez; GA Studdert; S Diez. 2018. Cultivos de cobertura y abonos verdes en el Sudeste bonaerense. II: Disponibilidad de nitrógeno y rendimiento de maíz. XXVI Congreso argentino de la Ciencia del Suelo. Tucumán. Argentina.
- De Sá Pereira, ED; JA Galantini & A Quiroga. 2012. Simulación de la dinámica de los residuos de cultivos de cobertura bajo siembra directa. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Della Maggiora, AI; AI Irigoyen; JM Gardiol; O Caviglia O & L Echarte. 2002. Evaluación de un balance de agua en el suelo para maíz. *Rev. Argent. Agrometeorología.* 2:167–176.
- Divito, GA; HE Echeverría; FE Andrade & VO Sadras. 2015. Diagnosis of S deficiency in soybean crops: Performance of S and N:S determinations in leaf, shoot and seed. *Field Crop Res.* 180: 167-175.
- Duval, ME; JA Galantini; JE Capurro & MJ Beltran. 2017. Producción y calidad de diferentes cultivos de cobertura en monocultivo de soja. *Ciencias Agronómicas. Revista XXIX* pp 07-13.
- Echeverría, H., N. Reussi Calvo, A. Pagani, y L. Fernández. 2011. Métodos de diagnóstico de deficiencia de azufre en los cultivos de trigo, soja de segunda y maíz. *Simposio Fertilidad 2011.* pp. 98-107.
- Eriksen, J; K Thorup-Kristensen & M Askegaard. 2004. Plant availability of catch crop sulfur following spring incorporation. *J Plant Nutr Soil Sci.* 167: 609-615.
- Eriksen, J. 2009. Soil sulfur cycling in temperate agricultural systems. *Adv Agron.* 102:55–89.
- Eriksen, J & K Thorup-Kristensen. 2002. The effect of catch crops on sulphate leaching and availability of S in the succeeding crop on sandy loam soil in Denmark. *Agric. Ecosys. Environ.* 90: 247-254.
- Eriksen, K; WD Carciochi; GA Divito & PE Abbate. 2018. Fertilización con azufre: efecto sobre la calidad industrial del trigo pan en el sudeste bonaerense. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Miguel de Tucumán.
- Fehr, WR & CE Caviness. 1977. Stages of soybean development. *Iowa Agric. Home Econ. Exp. Stn., Special Report* n° 80. Iowa State Univ. Ames. 12p.
- Gutierrez Boem, FH; P Prystupa & G Ferraris. 2007. Seed number and yield determination in sulfur deficient soybean crops. *J. Plant Nutr.* 30: 93–104.
- Islam, M & N Bhuiyan. 1998. Evaluation of various extractants for available sulfur in wetland rice (*oryza sativa*) soils of bangladesh. *Indian J Agric Sci.* 58: 603-606.
- Jahanzad, E; AV Barker; M Hashemi; T Eaton; A Sadeghpour & SA Weis. 2016. Nitrogen release dynamics and decomposition of buried and surface cover crop residues. *Agron J.* 108:1735-1741.
- Jani, AD; J Grossman; TJ Smyth & S Hu. 2016. Winter legume cover-crop root decomposition and N release dynamics under disking and roller-crimping termination approaches. *Renew Agric Food Syst.* 31:214–229.
- Johnson, GV. 1987. Sulfate: sampling testing, and calibration. In: Jr Brown (ed.). *Soil testing: sampling correlation, calibration and interpretation.* SSSA spec. publ. 21. SSSA, Madison, WI. p. 89-96.
- Kaiser, DE & K KIM. 2013. Soybean response to sulfur fertilizer applied as a broadcast or starter using replicated strip trials. *Agron J.* 105: 1189–1198.
- Keeney, DR & DW Nelson. 1982. Nitrogen inorganic forms. In: Page. A. L. *et al.* (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. pp. 643-698.

- Keeney, DR. 1982. Nitrogen-availability indices. In: Page, A. L. *et al.* (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties* American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. pp. 711-733
- Kitou, M & S Yoshida. 1994. Mulching effect of plant residues on soybean growth and soil chemical properties. *Soil Sci Plant Nutr.* 40:211-220.
- Klein, RF. 2013. Cultivos de cobertura: un puente para el nitrógeno. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica.* 11: 20-26.
- Kuzyakov, Y; JK Friedel & K. Stahr. 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biol. Biochem.* 32: 1485-1498.
- Lucheta, AR & MR Lambais. 2012. Sulfur in agriculture. *Rev Bras Cienc Solo.* 36: 1369-1379.
- Martinez, JP; PA Barbieri; HR Sainz Rozas & HE Echeverría. 2013. Inclusion of Cover Crops in Cropping Sequences with Soybean Predominance in the Southeast of the Humid Argentine Pampa. *The Open Agriculture Journal*, 2013, 7, (Suppl 1-M2) 3-10.
- Morla, FD; O Giayetto; DM Girardi; EM Fernandez; GA Cerioni; MIT Kearney; MG Violante & MB Rosso. 2015. Efecto de un cultivo de cobertura, sembrado durante la cosecha de maní, sobre el agua del suelo y rendimiento de un cultivo de soja. *XXX Jornada Nacional del Maní.* Gral. Cabrera, Córdoba.
- Navarro, G; M Boccolini; T Baigorria; M. Aimetta; A. Bertolla & C Cazorla. 2015. ¿Los cultivos de cobertura pueden modificar el patron de nodulación de soja? *Rev. Investig. Agropecu.* 41: 47-52.
- Pagani, A; HE Echeverría & H Sainz Rozas. 2009. Corn response to nitrogen and sulfur under different environments in the province of Buenos Aires. *Cienc Suelo* 27: 21-29.
- Pagano, MC & M. Miransari. 2016. The importance of soybean production worldwide. In: M. Miransari (ed.). *Abiotic and Biotic Stresses in Soybean Production.* Academic Press. pp 1-26.
- Paul, JW & BJ Zebarth. 1997. Denitrification and nitrate leaching during the fall and winter following dairy cattle slurry application. *Can. J. Soil Sci.* 77: 231-240.
- Pias, OHC; T Tiecher; MR Cherubin; M. Mazurana & C. Bayer. 2019. Crop Yield Responses to Sulfur Fertilization in Brazilian No-Till Soils : a Systematic Review. *Rev Bras Cienc Solo.* 43: 1-21.
- R Core Team. 2018. R: a language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria. www.r-project.org. 28 marzo 2019.
- Restovich, SB; AE Andriulo & SI Portela. 2012. Introduction of cover crops in maize-soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics. *Field Crop Res.* 128: 62-70.
- Reussi Calvo, N.I.; Echeverría, H.E.; Sainz Rozas, H. 2011. Diagnosing sulfur deficiency in spring red wheat: plant analysis. *J Plant Nutr.* 34:573-589.
- Reussi Calvo, NR; GA Studdert; MB Calandroni; NV Diovisaldi; FN Cabria & A Berardo. 2014. Nitrogeno incubado en anaerobiosis y carbono orgánico en suelos de Buenos Aires. *Cienc Suelo* 32: 189-196.
- Sainz Rozas, H; HE Echeverría & H Angelini. 2011. Niveles de carbono orgánico y ph en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana argentina. *Cienc Suelo.* 29: 29-37.
- Salvagiotti, F; G Ferraris; A Quiroga; M Barraco; H Vivas; P Prystupa; HE Echeverría & FH Gutiérrez Boem. 2012. Identifying sulfur deficient fields by using sulfur content; N:S ratio and nutrient stoichiometric relationships in soybean seeds. *Field Crop Res.* 135: 107-115.
- Scherer, HW. 2009. Sulfur in soils. *J. Plant Nutr Soil Sci.* 172: 326-335.
- Siczek, A & J Lipiec. 2011. Soybean nodulation and nitrogen fixation in response to soil compaction and surface straw mulching. *Soil Till Res.* 111:50-56.
- Sievers, T & RL Cook. 2018. Aboveground and Root Decomposition of Cereal Rye and Hairy Vetch Cover Crops. *Soil Sci Soc Am J.* 82: 147-155.
- Thorup-Kristensen, K & NE Nielsen. 1998. Modelling and measuring the effect of nitrogen catch crops on nitrogen supply for succeeding crops. *Plant Soil* 203: 79-89.
- Vyn, TJ; JG Faber; KJ Janovicek & EG Beauchamp. 2000. Cover crop effects on nitrogen availability to corn following wheat. *Agron. J.* 92: 915-924.
- Walkley, A & IA Black. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil. Sci.* 37:29-37.
- Whitehead, DC. 2000. Uptake and nutrient elements in grassland herbage. In: DC Whitehead (ed). *Nutrient elements in grassland: soil-plant-animal relationship.* CAB International, Oxon, UK pp 41-68.
- Xia, X; C Ma; S Dong; Y Xu & Z Gong. 2017. Effects of nitrogen concentrations on nodulation and nitrogenase activity in dual root systems of soybean plants. *Soil Sci Plant Nutr.* 63: 470-482..