

EFECTOS A LARGO PLAZO DE LA FERTILIZACIÓN EN EL SUDESTE BONAERENSE Y COMPARACIÓN CON LA REGIÓN PAMPEANA CENTRAL

Guillermo A. Divito¹, Hernán R. Sainz Rozas^{1,2,3}, Hernán E. Echeverría^{1,2}, Guillermo A. Studdert¹ y Nicolás Wyngaard¹

Introducción

Diversos trabajos han puesto de manifiesto que la importancia de la fertilización de los cultivos está dada no sólo a través de efectos directos, como mejoras en el rendimiento y/o en la calidad de los productos de cosecha, sino también a partir de cambios que se manifiestan a mediano y largo plazo en el suelo. En este sentido, distintos organismos e instituciones han aportado valiosa información sobre el efecto a largo plazo de una adecuada nutrición de cultivos, en especial a partir de ensayos ubicados en la Pampa Ondulada y Pampa Interior Plana (García et al., 2010; Irizar, 2010). La primera región comprende el noreste de la provincia de Buenos Aires y centro-sur de Santa Fe, y se caracteriza por presentar suelos Argiudoles típicos, con altos tenores de limo y arcilla hacia el norte de Buenos Aires, mientras que hacia el este de Santa Fe aumenta el contenido de arcilla y predominan Argiudoles vérticos. La Pampa Interior Plana, por su parte, presenta Hapludoles típicos hacia el sur de Santa Fe y noroeste de Buenos Aires y Hapludoles y Haplustoles énticos hacia el este de la provincia de Córdoba (Hall et al., 1992; **Figura 1**). El contenido de materia orgánica (MO) de los suelos de ambas unidades varía entre 2.0 y 3.5%.

El efecto de la fertilización sobre las propiedades del suelo está fuertemente condicionado por las características del mismo, del ambiente y de la secuencia de cultivos (Álvarez, 2005). Los suelos predominantes en el sudeste bonaerense (sector oriental de la Pampa Austral; **Figura 1**) son Argiudoles típicos y Paleudoles petrocálcicos con textura franca y un mayor contenido de MO respecto de la región central del país. Esto último les otorga una alta capacidad de resistir cambios promovidos por prácticas antrópicas (Seybold et al., 1999). Para dicha región, Studdert y Echeverría (2000) reportaron que la fertilización de los cultivos con nitrógeno (N) logró reducir las tasas de caída en el contenido de MO. Asimismo, Fabrizzi et al. (2003) informaron que dicha práctica permitió aumentar el contenido de MO de un suelo degradado producto de la larga historia agrícola, mientras que no observaron cambios en dicha propiedad en un suelo sin signos de degradación.

En general, el efecto de la aplicación de N sobre las propiedades del suelo es de mayor magnitud que el observado para otros nutrientes, debido a que normalmente es el nutriente más limitante. El azufre (S), por su parte, es un nutriente cuya disponibilidad en los suelos de la región pampeana ha mermado debido a

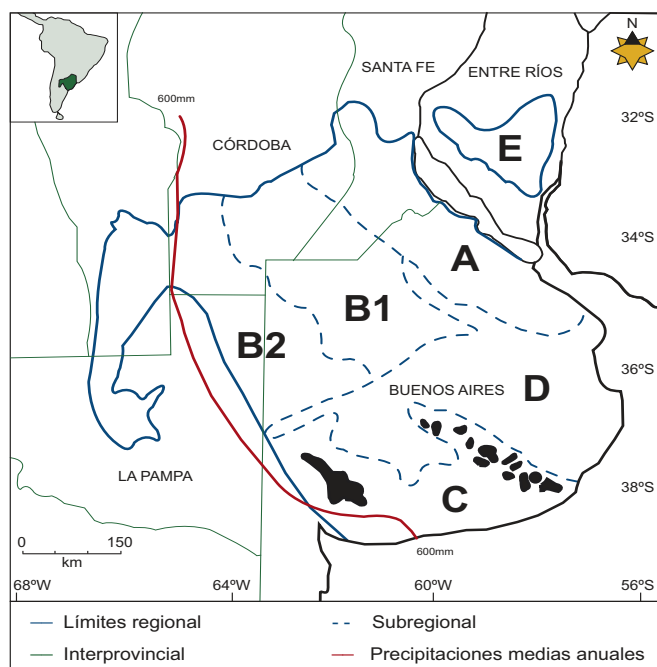


Figura 1. Subdivisión de la Región Pampeana. A. Pampa Ondulada; B. Pampa Interior (B1. Plana, B2. Occidental); C. Pampa Austral; D. Pampa Inundable; E. Pampa Mesopotámica. Fuente: Adaptado de Hall et al. (1992).

caídas en el contenido de MO, principal reservorio edáfico de S, al incremento en la superficie cultivada bajo siembra directa (SD), que reduce la mineralización de la MO, y al aumento en la demanda de los cultivos por mayor potencial de rendimiento (Echeverría, 2005). Las deficiencias de S son mayores en el norte de la región pampeana, donde los procesos mencionados se han desarrollado con mayor intensidad.

El primer objetivo del presente trabajo es difundir los resultados de un ensayo de larga duración del sudeste bonaerense donde se evaluó el efecto de la aplicación de N y S a los cultivos de una rotación. Un segundo objetivo es comparar dichos resultados con los obtenidos en la región pampeana central de Argentina, en base a los resultados presentados por Irizar (2010) para la localidad de Pergamino y por García et al. (2010) en distintos sitios correspondientes a la Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe (en adelante denominada Red CREA).

Materiales y métodos

El ensayo de larga duración se realizó entre los años 2001 y 2008 en la EEA INTA Balcarce (37°45' latitud sur y

¹ Facultad de Ciencias Agrarias, UNMDP, C.C. 276, (7620) Balcarce, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: guillermomodivito@yahoo.com.ar

² E.E.A. INTA, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

³ CONICET

Tabla 1. Dosis de nutrientes (kg ha⁻¹) aplicados a cada cultivo de la rotación.

| Trat. | --- 2001/02--- | | --- 2002/03 --- | | --- 2003/04 --- | | --- 2004/05 --- | | --- 2005/06 --- | | --- 2006/07 --- | | --- 2007/08 --- | |
|-------|----------------|----|-----------------|----|-----------------|----|-----------------|----|-----------------|----|-----------------|----|-----------------|----|
| | ---- Maíz ---- | | ---- Soya ---- | | - Trigo/Soya - | | - Trigo/Soya - | | ---- Maíz ---- | | ---- Soya ---- | | - Trigo/Soya - | |
| | N | S | N | S | N | S | N | S | N | S | N | S | N | S |
| N0 S1 | 0 | 15 | 0 | 15 | 0 | 15 | 0 | 15 | 0 | 15 | 0 | 15 | 0 | 15 |
| N1 S0 | 70 | 0 | 0 | 0 | 70 | 0 | 70 | 0 | 116 | 0 | 0 | 0 | 70 | 0 |
| N1 S1 | 70 | 15 | 0 | 15 | 70 | 15 | 70 | 15 | 116 | 15 | 0 | 15 | 70 | 15 |
| N2 S0 | 140 | 0 | 0 | 0 | 140 | 0 | 140 | 0 | 176 | 0 | 0 | 0 | 140 | 0 |
| N2 S1 | 140 | 15 | 0 | 15 | 140 | 15 | 140 | 15 | 176 | 15 | 0 | 15 | 140 | 15 |

58°18' longitud oeste), sobre un complejo Paleudol petrocálcico y Argiudol típico, con pendiente menor al 2% y textura franca (23% arcilla, 36% limo, 41% arena). El sitio experimental se mantuvo durante los 25 años previos al ensayo en rotación de cultivos agrícolas, bajo labranza convencional (LC), que incluyó arado de rejas y rastra de discos. Al inicio del ensayo, el contenido de carbono orgánico (CO) en 0-20 cm fue 25.4 g kg⁻¹, el pH 5.53 y el P-Bray 29 mg kg⁻¹ (H. Sainz Rozas y H. Echeverría, com. pers.).

El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con arreglo factorial y cuatro repeticiones, bajo una rotación que incluyó maíz, soya y trigo/soya de segunda. Se evaluaron dos factores: la aplicación de N (tres dosis: N0, N1 y N2) y de S (dos dosis: S0 y S1) (**Tabla 1**). La combinación N0-S0 no se incluyó en el ensayo. La fertilización se realizó al voleo a la siembra de los cultivos con urea (46-0-0) y sulfato de calcio (Ca SO₄; 16% S, 20% Ca). Además, se aplicó superfosfato triple de Ca (0-46-0; 20% P, 14% Ca) como fuente de fósforo (P) con el objetivo de evitar deficiencias.

Los residuos de biomasa aérea se estimaron según el índice de cosecha (0.45, 0.40 y 0.45 para maíz, soya y trigo, respectivamente) y la biomasa de raíces más rizo-deposiciones en el estrato 0-20 cm se calcularon según lo descrito por Domínguez y Studdert (2006), como una proporción de la biomasa aérea total (0.32, 0.32 y 0.43 para maíz, soya y trigo, respectivamente). Se asumió que la concentración de C en el material vegetal fue de 43%. El trigo sembrado en 2007 sufrió los efectos de helada en floración por lo que se consideró, para el cálculo del aporte de C, un rendimiento de 4000 kg ha⁻¹ en todos los tratamientos.

En 2008, previo a la siembra del maíz, se tomaron muestras de suelo de 0-5, 5-20, 20-40 y 40-60 cm de profundidad, se secaron en estufa a 30 °C y pasaron por tamiz de 2 mm. El fraccionamiento físico de la MO fue realizado según Cambardella y Elliott (1992). La determinación de C orgánico (CO) se realizó según Schlichting et al. (1995) y de N orgánico (NO) mediante combustión de las muestras y determinación con un analizador TruSpec CN (LECO, 2011). El CO y NO particulado (COP y NOP respectivamente) se obtuvo por diferencia entre el CO y NO y la

fracción asociada al limo + arcilla (COA y NOA). Para la determinación del N mineralizado en anaerobiosis (Nan), se incubaron 10 g de suelo durante 7 días a 40°C en condiciones anaeróbicas (muestras saturadas con agua destilada). Posteriormente, se cuantificó por microdestilación el N-NH₄⁺ formado durante la incubación.

La determinación del contenido de S-SO₄²⁻ intercambiable y en solución se realizó mediante la extracción con Ca(H₂PO₄)₂ y posterior análisis turbidimétrico con cloruro de bario (BaCl) y Tween 80 (Johnson, 1987). El contenido de N-NO₃⁻ se analizó por colorimetría (Keeney y Nelson, 1982). El pH del suelo se determinó en relación 1:2.5 (suelo-agua).

Se realizaron análisis de varianza con PROC GLM del Statistical Analysis System (SAS Institute, 1985). Como la combinación N0S0 no se incluyó en el ensayo, el efecto de las dosis de N se determinó considerando sólo los tratamientos que recibieron aporte de S (N0S1, N1S1 y N2S2). Por su parte, el efecto de la aplicación de S se determinó contrastando los promedios de N1 y N2 para los tratamientos sin (promedio de S0N1 y S0N2) y con aporte de S (promedio de S1N1 y S1N2).

Para establecer comparaciones respecto de lo observado en la Pampa Ondulada y en la Pampa Interior Plana, se discuten los resultados correspondientes a la Red CREA reportados por García et al. (2010) y los obtenidos por Irizar (2010) a partir del Ensayo de Larga Duración ubicado en la EEA INTA Pergamino. Los ensayos de la Red CREA comprenden 11 sitios distribuidos en el sudeste de la provincia de Córdoba, Sur de Santa Fe y norte de Buenos Aires. Los mismos se establecieron en el año 2000 y se evaluaron distintos planteos de fertilización en dos rotaciones bajo SD: maíz-trigo/soya de segunda (M-T/S) y maíz-soya-trigo/soya de segunda (M-S-T/S). Del ensayo de Pergamino, se emplearon los datos pertenecientes a la rotación M-T/S iniciada en 1983, también bajo SD.

Resultados y discusión

Rendimiento de los cultivos

Los cultivos de gramíneas manifestaron un incremento en el rendimiento en grano en respuesta a la fertilización

Tabla 2. Rendimientos de los cultivos fertilizados con N (N0, N1 y N2) y S (S0 y S1) para el período 2001-2008.

| Variable | 2001/02 | 2002/03 | ----- 2003/04 ----- | | ----- 2004/05 ----- | | 2005/06 | 2006/07 | ----- 2007/08 ----- | |
|---------------------------------|---------|---------|---------------------|----------|---------------------|----------|-----------|---------|---------------------|----------|
| | Maíz | Soya | Trigo | Soya 2da | Trigo | Soya 2da | Maíz | Soya | Trigo | Soya 2da |
| ----- kg ha ⁻¹ ----- | | | | | | | | | | |
| N0 | 6725 b | 3064 a | 4234 b | 2359 a | 2661 b | 1723 a | 9084 b | 3729 a | 4000 * | 1807 a |
| N1 | 9001 a | 2864 a | 5467 b | 784 b | 4378 a | 971 b | 10 254 ab | 3608 a | 4000 | 1551 a |
| N2 | 9586 a | 2979 a | 6930 a | 753 b | 4477 a | 883 b | 10 571 ab | 3550 a | 4000 | 1678 a |
| S0 | 8323 A | 3043 A | 5532 A | 768 A | 3876 B | 851 A | 10 220 A | 3423 A | 4000 | 1615 A |
| S1 | 9294 A | 2921 A | 6198 A | 768 A | 4427 A | 927 A | 10 412 A | 3579 A | 4000 | 1615 A |

Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas (p < 0.05). Minúsculas para N y mayúsculas para S.

* Valor estimado para el trigo de 2007, en reemplazo del cultivo perdido por helada.

nitrogenada. En promedio, la respuesta del cultivo de maíz fue de 23.3% (1723 kg ha⁻¹) y 29.4% (2174 kg ha⁻¹), mientras que la de trigo fue de 46.8% (1975 kg ha⁻¹) y 65.9% (2976 kg ha⁻¹) para N1 y N2, respectivamente (Tabla 2). La soya de primera implantada sobre parcelas con distinto historial de fertilización nitrogenada no manifestó diferencias en el rendimiento en los años 2002 y 2006. Contrariamente, en la soya de segunda implantada en 2004 y 2005 se determinaron disminuciones en el rendimiento en las parcelas sembradas sobre cultivos de trigo fertilizados con N, lo que podría obedecer a un mayor consumo de agua de éste último (Caviglia y Sadras, 2001). La aplicación de S, exceptuando la soya implantada en 2002, generó incrementos en el rendimiento de los cultivos (8.5% en promedio), aunque el mismo sólo resultó estadísticamente significativo en el trigo sembrado en 2004 (Tabla 2).

Estos resultados se diferencian de lo observado en la región pampeana central. Así, en el caso del maíz se pudo determinar que, si bien los rendimientos promedio presentados por Irizar (2010) para Pergamino (7108 kg ha⁻¹ para el tratamiento fertilizado con N) fueron inferiores a los de Balcarce, los determinados en la Red CREA (11 403 kg ha⁻¹ en promedio para las rotaciones M-T/S y M-S-T/S) fueron mayores y con respuestas levemente superiores a la aplicación de N (2653 kg ha⁻¹). Contrariamente, se observó que el rendimiento y la respuesta a la fertilización nitrogenada resultó superior para el trigo en el sudeste bonaerense, ya que el rendimiento promedio de la Red CREA fue de 2930 kg ha⁻¹ y la respuesta a N fue 735 kg ha⁻¹ (promedio para M-T/S y M-S-T/S). En soya, también se determinaron diferencias entre regiones, habiéndose reportado mayores rendimientos en la zona central, tanto para cultivos de primera (4304 kg ha⁻¹ para los ensayos de la Red CREA) como de segunda (3162 y 2398 kg ha⁻¹ para la Red CREA y Pergamino, respectivamente). Es de destacar que los resultados presentados por Irizar (2010) también muestran una tendencia a mayor rendimiento de la soya de segunda sembrada sobre parcelas no fertilizadas con N (480 kg ha⁻¹) en relación a las fertilizadas.

Las diferencias en el rendimiento de los cultivos obedecen principalmente a las condiciones climáticas de cada región. En el caso de los cultivos de verano, su rendimiento es mayor en el norte de la región pampeana debido a la mayor abundancia de precipitaciones en dicha estación respecto del sudeste bonaerense (Hall et al., 1992). Contrariamente, la productividad de los cultivos de invierno es mayor en el sudeste debido a la baja frecuencia de déficits hídricos (Reussi Calvo y Echeverría, 2006) y al mayor cociente fototermal (Q) (Magrin et al., 1993)

Para S, la escasa respuesta de los cultivos a la fertilización que se observó en el sudeste bonaerense coincide con lo esperado, puesto que la deficiencia del nutriente en la región no es generalizada (Reussi Calvo, 2009; Pagani et al., 2009; Divito et al., 2010). Contrariamente, en la región centro del país, se han determinado respuestas de mayor magnitud, siendo la soya de segunda y el maíz los cultivos que mayor incremento en rendimiento manifiestan (García et al., 2010). Estas diferencias entre regiones obedecerían principalmente al menor contenido de MO de los suelos de la zona norte.

Aporte de carbono

Para ambientes templados, se considera que la producción de residuos de cultivos y su manejo son los factores más importantes en la dinámica de la MO (Stevenson y Cole, 1999). En este sentido, el aporte de C estimado a través de las biomásas aérea y radical y de los exudados radicales siguió la misma tendencia que el rendimiento, con incrementos en la medida que la dosis de N y S fue mayor. Para el Sudeste Bonaerense, se ha reportado que la aplicación de N genera aumentos en la cantidad de C que ingresa al suelo en una rotación (Domínguez et al., 2005), pero para S sólo se han informado mayores aportes de C para cultivos en particular, como maíz (Pagani et al., 2009) y trigo (Reussi Calvo, 2009). De este modo, lo estimado en el presente trabajo pone de manifiesto que la adecuada provisión de este último nutriente, que manifiesta deficiencias moderadas en la zona, podría tener un impacto positivo sobre la variación del C edáfico. Esto adquiere

especial importancia en el norte de la región pampeana, donde las deficiencias de S son más pronunciadas y, por ende, la adecuada provisión del nutriente tendría un impacto mayor sobre el balance de C del sistema.

Carbono orgánico del suelo

Luego de 7 años de iniciado el ensayo en Balcarce, la fertilización con N y S a los cultivos que integraron la rotación, no produjo diferencias en el contenido de CO ni en ninguna de sus fracciones, COP y COA, a pesar de la distinta cantidad de C que ingresó al suelo a través de los residuos. El COP es considerado la fracción más lábil del CO y, por ende, la más susceptible a expresar los efectos de las distintas prácticas de manejo (Janzen et al., 1998). A pesar de ello, COP sólo manifestó una leve tendencia a aumentar en el estrato 0-5 cm conforme se incrementó la dosis de N y S (3% y 13% para N1 y N2 respecto a N0 y 8% para S1 respecto a S0). Similares resultados fueron obtenidos en la región por Domínguez et al. (2009). Sin embargo, Fabrizzi et al. (2003) reportaron que, según la condición inicial del suelo, hubo respuestas contrastantes en el cambio del contenido de CO debido al aporte de N. Así, en suelos no degradados provenientes de una pastura y manejados bajo SD, la aplicación de 150 kg N ha⁻¹ año⁻¹ no generó diferencias en CO respecto a una condición sin fertilizar. Contrariamente, en un suelo degradado bajo LC, la aplicación de 120 kg N ha⁻¹ año⁻¹ generó aumentos en el contenido de CO en el estrato 0-7.5 cm respecto del testigo.

Para Pergamino, Irizar (2010) reportó que no existieron diferencias en el CO ni en sus fracciones entre tratamientos fertilizados con distintas dosis de N. En los ensayos de la Red CREA, sólo se observó una tendencia de incremento en el contenido de CO en la mayoría de los sitios comparando los tratamientos testigo y NPS (García et al., 2010), mientras que en el COP, se determinaron por igual tendencias de aumento y disminución en aproximadamente la mitad de los ensayos. Sólo presentaron cambios significativos dos sitios de la Red: aumento en La Marta (sur de la provincia de Córdoba) y disminuciones en San Alfredo (sur de la provincia de Santa Fe).

Una de las explicaciones propuestas para la ausencia de incrementos en el contenido de CO en el sudeste bonaerense, es la escasa diferencia entre tratamientos en el aporte de C por residuos en relación al alto contenido de CO del suelo. En la región central del país, el contenido de CO del suelo es sensiblemente menor al del sudeste bonaerense, lo que a priori daría indicios de una mayor probabilidad de incrementos del mismo en respuesta a la fertilización. Sin embargo, los resultados obtenidos en dicha región no han demostrado esta tendencia. Para el caso del N, Irizar (2010) lo atribuye a la alta capacidad de los suelos de proveer el nutriente a los cultivos y, por ende, la escasa diferencia que se registra en el aporte de C entre tratamientos fertilizados y no fertilizados.

pH

La aplicación de dosis crecientes de N generó, luego de 7 años, menores valores en el pH del suelo en el estrato 0-5 cm. Contrariamente, a 5-20 cm, no se evidenciaron diferencias de pH entre dosis de dicho nutriente (Tabla 3).

La urea, al hidrolizarse y producir nitrato (NO₃⁻) acidifica el suelo produciendo 2 moles de H⁺ por mol (Bolan et al., 1991). Si el NO₃⁻ es absorbido por las plantas se neutraliza el efecto acidificante del fertilizante, por el contrario, si permanece en el suelo o es removido del mismo por lavado se genera una disminución en el pH (Bolan et al., 1991). En el sudeste bonaerense, el N que no es absorbido por los cultivos tiene una alta probabilidad de sufrir pérdidas por lavado (Echeverría y Sainz Rozas, 2006), las cuáles explicarían mayoritaria-mente la acidificación ocurrida.

El yeso agrícola (sulfato de calcio di-hidratado) es una sal neutra que no modifica el pH del suelo aunque indirectamente, a través del ión Ca²⁺, puede generar aumentos en el pH de suelos levemente ácidos (Wong y Swift, 2003). Sin embargo, la baja dosis de yeso empleada en el presente ensayo (94 kg ha⁻¹ año⁻¹) sería la causa de que no se hayan determinado diferencias en el pH entre tratamientos.

En los ensayos pertenecientes a la Red CREA, los sitios bajo rotación M-T/S manifestaron mayores diferencias en pH entre tratamientos respecto de la rotación M-S-T/S, como la evaluada en el presente trabajo. Los autores atribuyen estos resultados al uso más intensivo de N en la primera, producto de la aplicación anual al trigo y maíz durante 8 años. Así, se determinó que el tratamiento que recibió N, P, y S disminuyó 0.5 y 0.2 unidades respecto del testigo para M-T/S y M-S-T/S, respectivamente. Estos resultados se evidenciaron en el estrato 0-20 cm por lo que, basados en la mayor acidificación superficial observada en el sudeste bonaerense, podría suponerse que la misma también fue más pronunciada en 0-5 cm.

Tabla 3. Valores promedio de pH y CV a 0-5 y 5-20 cm de profundidad de los tratamientos según la dosis de N y S aplicada.

| Trat. | pH | | | |
|-------|--------|-------|---------|-------|
| | 0-5 cm | | 5-20 cm | |
| | CV, % | CV, % | CV, % | CV, % |
| N0 | 5.8 a | 6.0 | 5.8 a | 7.5 |
| N1 | 5.5 b | 4.0 | 5.8 a | 1.9 |
| N2 | 5.3 c | 3.1 | 5.7 a | 0.6 |
| S0 | 5.4 A | 3.6 | 5.8 A | 1.4 |
| S1 | 5.4 A | 3.7 | 5.8 A | 1.5 |
| N * S | ns | | ns | |

Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias estadísticamente significativas (p < 0.05). Minúsculas y mayúsculas para dosis de N y S, respectivamente.

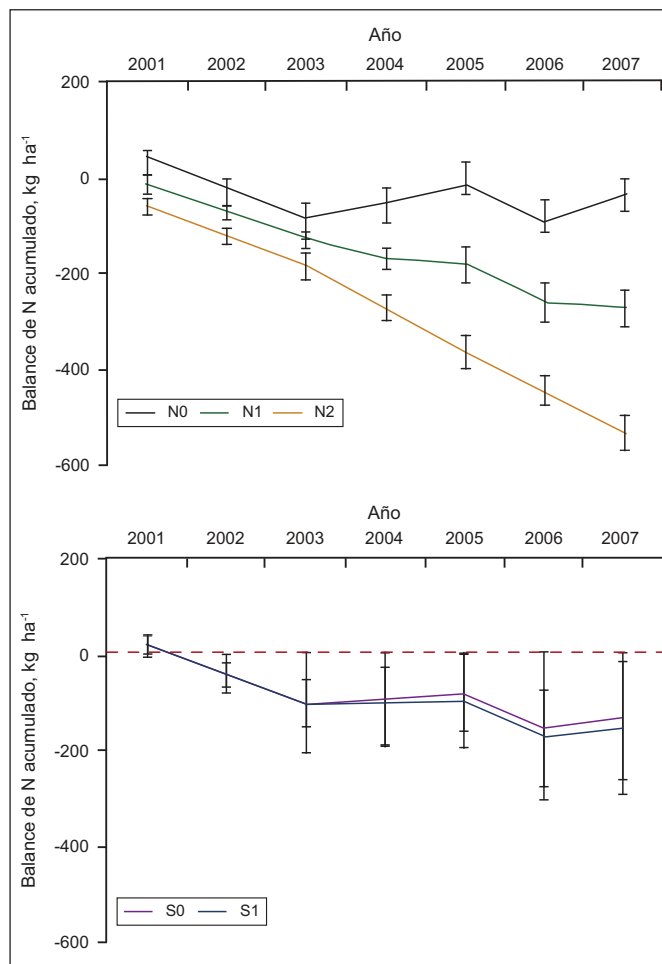


Figura 2. Balance acumulado del N edáfico según la dosis de N y S aplicada. Las líneas verticales indican el desvío estándar de la media.

En Pergamino, y luego de 25 años, la fertilización nitrogenada produjo acidificación del estrato 0-5 cm (5.53 y 6.22 para fertilizado y no fertilizado, respectivamente). Además, dicha diferencia se mantuvo en el espesor de 5-10 cm, registrándose valores de 5.73 y 6.07 para tratamientos con y sin N, respectivamente.

El alto contenido de MO confiere a los suelos del sudeste bonaerense una alta capacidad de resistir procesos de acidificación (Wong y Swift, 2003). De este modo, los suelos de dicha región presentarían una mayor tolerancia a la acidificación producto de la aplicación de altas dosis de N respecto de los de la Pampa Ondulada y de la Pampa Interior Plana. Si bien los ensayos comparados presentan diferencias en cuanto a tipo de rotación, dosis de N y duración, es factible establecer que la acidificación fue mayor en la región norte debido a la mayor magnitud de los cambios superficiales (0-5 cm) y/o a que éstos ocurrieron en un estrato más profundo (0-20 cm).

Nitrógeno orgánico del suelo

El balance de N edáfico, diferencia entre la cantidad de N que ingresó al suelo a través del fertilizante y las salidas en los granos, varió inversamente con la dosis de N pero no hubo relación con la dosis de S (Figura 2). Así, aunque el balance anual acumulado fue negativo en todos los casos, en la medida que se redujo la cantidad de N aplicada, la

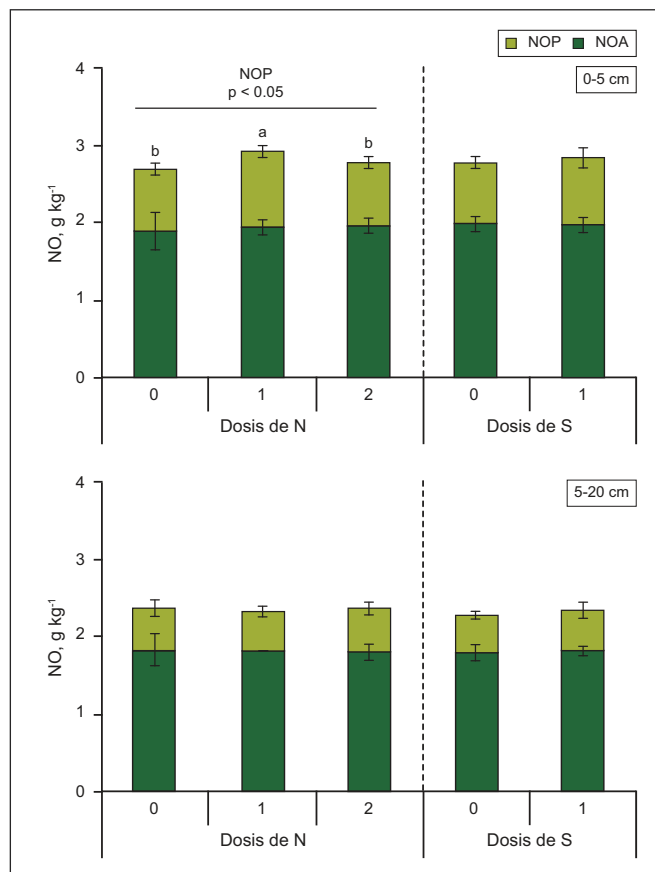


Figura 3. Contenido de nitrógeno orgánico particulado (NOP), asociado (NOA) y total (NO) en 0-5 cm (superior) y 5-20 cm (inferior) de profundidad según la dosis de N y S aplicada. Líneas verticales indican desvío estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para el NOP ($p < 0.05$).

magnitud del déficit se incrementó (Figura 2).

El NO y el NOA no difirieron entre tratamientos que recibieron distintas dosis de N, tanto en 0-5 como en 5-20 cm (Figura 3). Contrariamente, para la profundidad de 0-5 cm, el N en la fracción particulada (NOP) resultó mayor en el suelo que recibió la dosis intermedia de N, aunque en 5-20 cm no se observaron dichas diferencias. Por su parte, la aplicación de S no generó diferencias en el contenido de N en ninguna de las fracciones de la MO, para ninguna de las profundidades.

En términos generales, estos resultados son coincidentes con lo informado por Domínguez et al. (2009) y Diovisalvi et al. (2008) para suelos de la misma región, y por Irizar (2010) para Pergamino. En este sentido, considerando las diferencias entre tratamientos en el balance del N edáfico, la ausencia de diferencias en el contenido de NO podría deberse a que el efecto de dicha variación es pequeño en relación al alto contenido de NO del suelo (efecto similar a lo observado para CO) y/o a que parte del N aplicado en los tratamientos fertilizados salió del sistema, principalmente por lavado.

Nitrógeno mineralizado en anaerobiosis

La aplicación de la dosis más elevada de N generó un menor potencial de mineralización de dicho nutriente en el

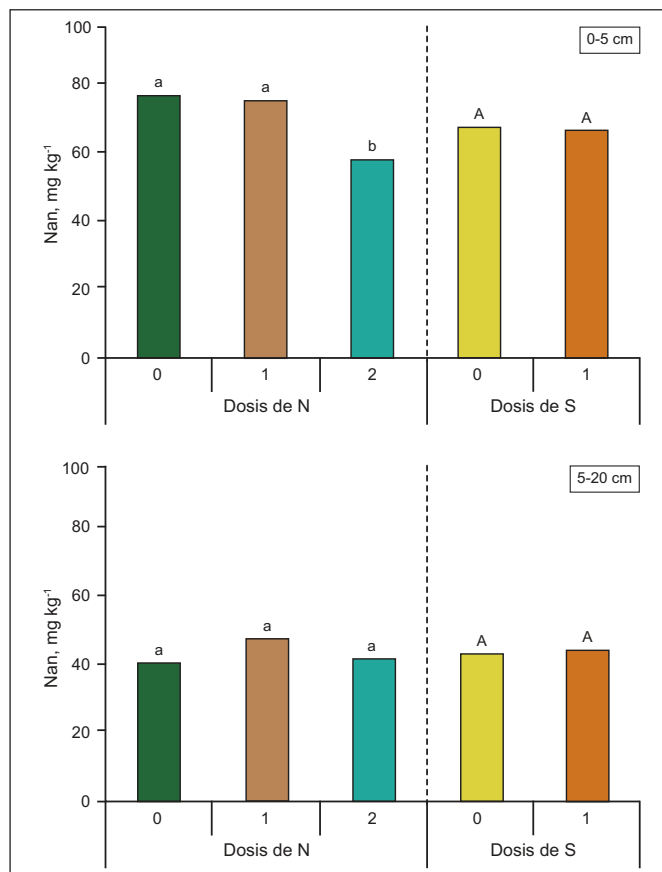


Figura 4. Nitrógeno anaeróbico (Nan, mg kg⁻¹) en 0-5 cm (superior) y 5-20 cm (inferior) de profundidad según la dosis de N y S aplicada. Letras distintas indican diferencias entre tratamientos (p < 0.05). Minúsculas para N y mayúsculas para S.

estrato 0-5 cm, respecto de las otras dos dosis (**Figura 4**). En 5-20 cm, no se detectaron cambios significativos en función de las dosis de N. El Nan no se modificó como consecuencia de la aplicación de S en ninguna de las profundidades (**Figura 4**). Estos resultados coinciden con los reportados para suelos de la región por Domínguez et al. (2009) y Genovese et al. (2009) para el estrato 0-20 cm. Contrariamente, de forma general en la Red CREA, los tratamientos no difirieron en el valor de Nan.

En general, tanto para suelos de distintas regiones agrícolas del mundo (Westerhof et al., 1998), como para la región sudeste bonaerense en particular (Fabrizzi et al., 2003), se han obtenido estrechas asociaciones entre el Nan y el contenido de CO, NO y, en especial, con fracciones de mayor labilidad como el COP y NOP. Sin embargo, en el ensayo realizado en Balcarce sólo se observó una leve asociación ($R^2 = 0.20$) del Nan con el NOP del estrato 0-5 cm. Esta ausencia de relación entre las variables analizadas obedecería al estrecho gradiente determinado en cada una de ellas.

Para el estrato superficial del suelo (0-5 cm) se observó una alta asociación entre el Nan y el pH aunque la misma no fue evidente en los 5-20 cm (**Figura 5**). El pH es considerado uno de los principales condicionantes del ciclado de C y N debido a que controla la diversidad, la

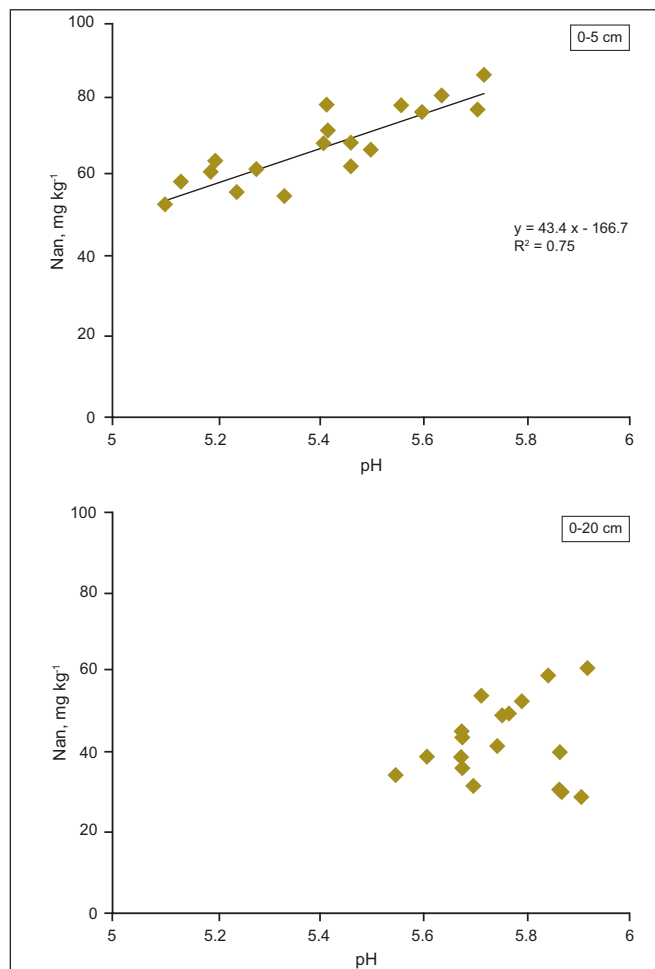


Figura 5. Relación del nitrógeno anaeróbico (Nan) con el pH del suelo en el estrato 0-5 y 5-20 cm.

biomasa y la actividad de los microorganismos del suelo. En este sentido, si bien el proceso de mineralización puede llevarse adelante en un rango de pH amplio, los valores óptimos oscilan entre 6.0 y 8.0 (Paul, 2007).

En Pergamino, Irizar (2010) determinó que el menor valor de pH superficial en los tratamientos fertilizados estuvo en relación con la disminución del C de la biomasa microbiana y sugirieron que la misma podría estar indicando un menor potencial de mineralización. Estos resultados han sido observados en situaciones similares a nivel mundial (Liebig et al., 2002) y advierten sobre los posibles efectos negativos de la acidificación por uso de altas dosis de N. Sin embargo, datos surgidos de la Red CREA aportan evidencias contrarias a las antes expuestas. Así, para el ensayo ubicado en Teodelina (sur de la provincia de Santa Fe), Conforto et al. (2010) determinaron que la aplicación de N, P y S durante 8 años incrementó la cantidad de unidades formadoras de colonia (UFC) de hongos y bacterias, y la actividad de dichos microorganismos respecto de tratamientos sin fertilizar, a pesar de que el pH del suelo resultó menor (5.6 y 6.2 en 0-20 cm para los tratamientos fertilizado y testigo, respectivamente). Los autores atribuyeron estos resultados a la mayor producción de los cultivos fertilizados, que sirvió de sustrato para la actividad microbiana. La aplicación de S, por su parte, generó un

leve aumento en las UFC de hongos y bacterias (Conforto et al., 2010).

Nitratos y sulfatos

La aplicación de dosis de N a los cultivos de gramíneas, no generó cambios en el contenido de $N-NO_3^-$ ni de $S-SO_4^{2-}$ en el estrato 0-60 cm (Tabla 4). Por su parte, la fertilización con S tampoco generó diferencias en la disponibilidad de $N-NO_3^-$ en dicha profundidad. Sin embargo, se pudo determinar una mayor cantidad de $S-SO_4^{2-}$ en los tratamientos fertilizados con S durante el período de ensayo. Estos resultados advierten sobre posibles diferencias en la residualidad de N y S. En el caso del N, los resultados obtenidos coinciden parcialmente con los observados en la Red CREA, donde tampoco se observaron efectos residuales en los primeros 5 años de la rotación M-T/S. Los mismos fueron evidentes a partir del año 2005, alcanzándose diferencias entre tratamientos de hasta 50 kg $N-NO_3^- ha^{-1}$ en 0-60 cm. Resulta relevante que dichas diferencias se registraron aún cuando los balances de N fueron negativos en todos los tratamientos, como sucedió en el presente ensayo. Contrariamente, en la rotación M-S-T/S de la Red CREA no se evidenciaron efectos residuales, probablemente por un balance más negativo de N y por la menor frecuencia de aplicación del nutriente (García et al., 2010).

La cantidad de $N-NO_3^-$ residual depende, primeramente, del balance de N de los cultivos. Tal como se mencionó, las salidas de N a través de los granos superaron a los ingresos vía fertilizante durante el período de ensayo para todos los tratamientos siendo más negativa la variación en la medida que la dosis de N fue menor (Figura 2). Sin embargo, estas diferencias en la variación del N no se reflejaron en cambios en la disponibilidad de $N-NO_3^-$ pre-siembra. En este sentido, las pérdidas del N edáfico explicarían la similitud en la disponibilidad del nutriente entre tratamientos. En la región Sudeste Bonaerense, el lavado de NO_3^- es el mecanismo más importante de salidas de N del sistema (Echeverría y Sainz Rozas, 2005).

La mayor disponibilidad de $S-SO_4^{2-}$ que se determinó en el tratamiento fertilizado ya había sido observada en el mismo ensayo en 2004 y 2006 (Divito et al., 2010). Una de las razones que explicarían la mayor residualidad del $S-SO_4^{2-}$ respecto al $N-NO_3^-$ es la capacidad del primero de establecer uniones covalentes con las partículas coloidales del suelo, lo que le confiere mayor resistencia a la lixiviación. Además, el SO_4^{2-} puede formar precipitados con Ca^{2+} , que en el sudeste bonaerense se han observado como co-precipitados junto al $CaCO_3$ (San Martín y Echeverría, 1995).

En la Red CREA, las diferencias entre tratamientos en la disponibilidad de $S-SO_4^{2-}$ comenzaron a hacerse evidentes en 2003. Al igual que para $N-NO_3^-$, las mismas fueron mayores en la rotación M-T/S. García et al. (2010) plantean que las diferencias entre tratamientos en la disponibilidad de S previo a la siembra del maíz y trigo sólo representaron una

Tabla 4. Contenido de nitrógeno de nitratos ($N-NO_3^-$) y azufre de sulfatos ($S-SO_4^{2-}$) en 0-60 cm según la dosis de N y S aplicada.

| Trat. | ----- $N-NO_3^-$ ----- | | ----- $S-SO_4^{2-}$ ----- | |
|-------|------------------------|-------|---------------------------|-------|
| | kg ha ⁻¹ | CV, % | kg ha ⁻¹ | CV, % |
| N0 | 89.6 a | 9.4 | 21.0 a | 7.8 |
| N1 | 88.6 a | 9.5 | 19.2 a | 28.6 |
| N2 | 81.6 a | 7.8 | 18.6 a | 16.5 |
| S0 | 80.2 A | 22.0 | 15.2 B | 33.2 |
| S1 | 85.1 A | 19.2 | 18.9 A | 43.7 |
| N * S | ns | | ns | |

CV = coeficiente de variación. Letras diferentes indican diferencias entre tratamientos (p < 0.05).

pequeña proporción de las diferencias determinadas en el balance de S del sistema. Esto indica que la fracción restante pudo haber sido inmovilizada en la MO, retenida en formas inorgánicas y/o haber salido del sistema, principalmente por lixiviación.

Consideraciones finales y conclusiones

La aplicación de N a los cultivos generó respuestas moderadas en la cantidad de C retornado al suelo, tanto en el sudeste bonaerense como en el norte de la región pampeana. Esto generó que los contenidos de CO y NO del suelo no se modificaran significativamente. Por el contrario, la fertilización nitrogenada generó un menor pH del suelo respecto de tratamientos sin fertilizar en ambas regiones. Esto advierte sobre la necesidad de implementar prácticas para monitorear y eventualmente corregir problemas de acidez. En especial, se destaca la relación directa entre en pH y el Nan que se evidenció en Balcarce.

En el sudeste bonaerense no se determinó residualidad de $N-NO_3^-$, de manera similar a lo observado en la Red CREA en la rotación M-S-T/S, aunque difiere de lo reportado en M-T/S. La falta de residualidad obedecería a la ocurrencia de pérdidas por lixiviación y pone en evidencia la necesidad de ajustar las dosis de N aplicadas, para evitar consecuencias negativas para el ambiente. Por su parte, la aplicación de S no generó modificaciones en la mayoría de las propiedades del suelo, aunque se determinó residualidad de $S-SO_4^{2-}$. Estos resultados confirman lo obtenido en otros ensayos, y deberían ser considerados a la hora de definir estrategias de fertilización con el nutriente.

En resumen, los resultados obtenidos en el sudeste bonaerense no difirieron en gran medida respecto de lo observado en la Pampa Ondulada ni en la Pampa Interior Plana, a pesar del menor contenido de MO en los suelos de esas regiones y, por ende, la menor resiliencia que presentan. Sin embargo, el efecto que la fertilización de cultivos genera en el suelo debería continuar bajo estudio.

Bibliografía

- Álvarez, R. 2005. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. *Soil Use Manage.* 21:38–52.
- Bolan, N.S., M.J. Hedley, y R.E. White. 1991. Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures. *Plant Soil.* 134:53–63.
- Cambardella, C.A., y E.T. Elliott. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:777–783.
- Caviglia, O.P., y V.O. Sadras. 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water and radiation-use efficiency of wheat. *Field Crops Res.* 69:259-266.
- Conforto, E.C., G. Figoni, A. Rovea, M. Boxler, C. Oddino, J. García, G. March, J. Meriles, y S. Vargas Gil. 2010. Evaluación del efecto de la fertilización sobre las comunidades microbianas edáficas. *Actas 22° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Rosario, Argentina. En CD.
- Diovisalvi, N.V., G.A. Studdert, G.F. Domínguez, y M.J. Eiza. 2008. Fracciones de carbono y nitrógeno orgánicos y nitrógeno anaeróbico bajo agricultura continúa con dos sistemas de labranza. *Ci. Suelo*, 26(1):1-11.
- Divito, G.A., N. Wyngaard, H.R. Sainz Rozas, y H.E. Echeverría. 2010. Residualidad de la aplicación de azufre en un ensayo de larga duración del sudeste bonaerense y su efecto sobre el maíz. *Actas 22° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Rosario Argentina. En CD.
- Domínguez, G.F., y G.A. Studdert. 2006. Balance de carbono en un Molisol bajo labranza convencional. *Actas 20° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy, Argentina.* En CD.
- Domínguez, G.F., G.A. Studdert, y H.E. Echeverría. 2005. Propiedades del suelo: efecto de las prácticas de manejo. *En: H.E. Echeverría; F.O. García (Eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos.* Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 207-253.
- Domínguez, G.F., N.V. Diovisalvi, G.A. Studdert, y M.G. Monterubbianesi. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on mollisols of the southeastern Pampas. *Soil Till. Res.* 102:93–100.
- Echeverría, H.E. 2005. Azufre. *En: H.E. Echeverría & F.O. García (Eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos.* Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. p. 139-160.
- Echeverría, H.E., y H.R. Sainz Rozas. 2005. Nitrógeno. *En: H.E. Echeverría & F.O. García (Eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos.* Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 69-97.
- Fabrizzi, K.P., A. Morón, y F.O. García. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded mollisols in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1831–1841.
- García, F.O., M. Boxler, J. Minteguiaga, L. Firpo, I.A. Ciampitti, A.A. Correndo, F. Bauschen, A. Berardo, y N.I. Reussi Calvo. 2010. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009. Ed. AACREA. 64 p.
- Genovese, M.F., H.E. Echeverría, G.A. Studdert, y H.R. Sainz Rozas. 2009. Nitrógeno de amino-azúcares en suelo: calibración y relación con el nitrógeno incubado anaeróbico. *Ci. Suelo* 27(2):225-236.
- Hall, A.J., C.M. Rebella, C.M. Ghersa, y J.P. Culot. 1992. Field-crop systems of the Pampas. pp. 413-450. *In C. J. Pearson (ed).. Ecosystems of the world. Field Crop Ecosystems.* Elsevier Scientific, Amsterdam-London-New York-Tokyo.
- Irizar, A.B. 2010. Cambios en las reservas de materia orgánica del suelo y sus fracciones granulométricas: efecto de la secuencia de cultivo, del sistema de labranza y de la fertilización nitrogenada. Tesis presentada para optar al título de Magister. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 108 p.
- Janzen, H.H., C.A. Campbell, R.C. Izaurralde, B.H. Ellert, N. Juma, W.B. McGill, y R.P. Zentner. 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil Till. Res.* 47:181-195.
- Johnson, G.V. 1987. Sulfate: Sampling testing, and calibration. *In: Brown J.R. (Ed.). Soil testing: Sampling correlation, calibration and interpretation.* SSSA Spec. Publ. 21. SSSA, Madison, WI. pp. 89-96.
- Keeney D.R. y D.W. Nelson. 1982. Nitrogen inorganic forms. *In: AL Page (Ed.) Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties Agron. Monog 9 ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, EE.UU.* pp. 643-698.
- LECO. 2011. Organic application notes. [En línea] (www.leco.com) [Consulta: 29/04/11].
- Liebig, M.A., G.E. Varvel, J.W. Doran, y B.J. Wienhold. 2002. Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the western corn belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 596–601.
- Magrin, G.O., A.J. Hall, C.H. Baldy, y M.O. Grondona. 1993. Spatial and interannual variations in the photothermal quotient: implications for the potential kernel number of wheat crops in Argentina. *Agr Forest Meteorol.* 67:29-41.
- Pagani, A., H.E. Echeverría, y H.R. Sainz Rozas. 2009. Respuesta a nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en diferentes ambientes en la provincia de Buenos Aires. *Ci. Suelo* 27(1):21-29.
- Paul, E.A. 2007. Soil microbiology, ecology, and biochemistry: Academic Press. Amsterdam, Boston. 3ª. Edición. 532 p.
- Reussi Calvo, N.I., y H.E. Echeverría. 2006. Estrategias de fertilización nitrogenada en trigo: balance hídrico para el sur bonaerense. *Ci Suelo* 24(2):115-122.
- Reussi Calvo, N.I. 2009. Deficiencias de azufre en trigo: indicadores de disponibilidad en material vegetal. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Agrarias. UNMdP. Balcarce, Argentina. 127 p.
- San Martín, N., y H.E. Echeverría. 1995. Determinación del contenido de sulfato en suelos del sudeste bonaerense. *Ci. Suelo* 13:95-97.
- SAS Institute. 1985. SAS user's guide. SAS Institute, Inc., Cary, NC. 1030 p.
- Schlichting, E., H.P. Blume, y K. Stahr. 1995. *Bodenkundliches Praktikum. Pareys Studentexte* 81, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, 295 p.
- Seybold C.A., J.E. Herrick y J.J. Brejda. 1999. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. *Soil Science* 164:224-234.
- Stevenson, F.J., y M.A. Cole. 1999. Cycles of soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. 2a ed. John Wiley & Sons, Inc., USA. 448 p.
- Studdert, G.A., y H.E. Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1496–1503.
- Westerhof, R., L. Vilela, M. Ayarza, y W. Zech. 1998. Land use effects on labile N extracted with permanganate and the nitrogen management index in the Cerrado region of Brazil. *Biol. Fertil. Soils* 27:353–357.
- Wong, M.T.F., y R.S. Swift. 2003. Role of organic matter in alleviating soil acidity. *In: Rengel, Z. (Ed.). Handbook of Soil Acidity.* Marcel Dekker. New York. USA. pp. 337-358. ○