

RESPUESTA A NITRÓGENO Y AZUFRE EN EL CULTIVO DE MAÍZ EN DIFERENTES AMBIENTES DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

AGUSTÍN PAGANI¹; HERNÁN E ECHEVERRÍA¹ & HERNAN SAINZ ROZAS^{1,2}

¹ Unidad Integrada (UIB) EEA INTA Balcarce - Fac. Ciencias Agrarias (UNMP). CC.276, (7620), Balcarce, Argentina.

Correo electrónico: paganiagustin@hotmail.com

² CONICET

Recibido: 31-07-08

Aceptado: 09-01-09

RESUMEN

El nitrógeno (N) y el azufre (S) son nutrientes de gran relevancia para el cultivo de maíz en la Región Pampeana. Sin embargo, no existe suficiente evidencia bibliográfica que analice el efecto de la aplicación de ambos nutrientes y de su interacción, sobre la respuesta en grano, la eficiencia de uso de N y S del fertilizante (EUFN y EUFS) y la rentabilidad de la fertilización en el cultivo de maíz. El objetivo de este trabajo fue evaluar: 1) el efecto de la aplicación de N y S sobre el rendimiento y la EUFN y EUFS y 2) la conveniencia económica de la fertilización en ambientes de la provincia de Buenos Aires. Dos experimentos en Balcarce (Bce I y Bce II) y otros dos en 9 de Julio (9dJ I y 9dJ II) fueron realizados durante las campañas 2005-06, 2006-07 y 2007-08 evaluando dosis de N y S. No se determinó interacción N-S para ninguna de las variables estudiadas. La aplicación de N incrementó los rendimientos ($p < 0,01$) hasta en un 32, 15, 54 y 72% en Bce I, Bce II, 9dJ I y 9dJ II, respectivamente, mientras que la aplicación de S lo hizo en Bce II, 9dJ I y 9dJ II ($p < 0,05$) (respuestas máximas de 11, 10 y 22%, respectivamente). La EUFN no se vio sistemáticamente afectada por la aplicación de S. Por su parte, la EUFS no se modificó con el aumento de la dosis de S, pero mejoró cuando se fertilizó con N en Bce II y 9dJ I. La rentabilidad de la fertilización fue variable pero resultó favorable en ambientes de alta productividad y escaso suministro de ambos nutrientes (alcanzando valores máximos de 4,16 \$/\$ invertido para N en 9dJ I y de 18,56 \$/\$ invertido para S en 9dJ II). Es necesario continuar explorando la interacción N-S en el cultivo de maíz a fin de generar información que permita realizar acertadas recomendaciones de fertilización.

Palabras clave. Cultivo de maíz, nitrógeno, azufre.

CORN RESPONSE TO NITROGEN AND SULFUR UNDER DIFFERENT ENVIRONMENTS IN THE PROVINCE OF BUENOS AIRES

ABSTRACT

Nitrogen (N) and sulfur (S) are very important nutrients in corn production in the Pampas Region. However, there is not enough bibliographic evidence related to N and S effects and their interaction on grain yield response, N and S fertilizer use efficiency (EUFN and EUFS) and the economic benefit of fertilizing with N and S. The objective of this work was to evaluate N and S application effects on corn grain yield, EUFN and EUFS, and the fertilization economic return under different environments in the province of Buenos Aires. Two experiments with different N and S rates were conducted at Balcarce (Bce I and Bce II) and two at 9 de Julio (9dJ I and 9dJ II) during 2005-06, 2006-07 and 2007-08. No N-S interactions were found in any studied variable. Nitrogen application increased grain yield ($p < 0.01$) up to 32, 15, 54 and 72% at Bce I, Bce II, 9dJ I and 9dJ II, respectively; whereas S application increased grain yield at Bce II, 9dJ I and 9dJ II ($p < 0.05$) (maximum responses of 11, 10 and 22%, respectively). The EUFN was not systematically affected by S application. The EUFS did not change with increasing S rates, but it improved when N was applied at Bce II and 9dJ I. Fertilization economic return varied but it was favourable at high productivity environments with low soil availability of both nutrients (reaching maximum values of 4.16 \$/\$ invested in N at 9dJ I and of 18.56 \$/\$ invested in S at 9dJ II). It is imperative to continue studying N-S interactions in corn in order to adjust fertilizer recommendations.

Key word. Corn, nitrogen, sulfur.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de maíz presenta gran relevancia dentro de la rotación agrícola ya que brinda sustanciales beneficios al sistema, debido principalmente a la gran cobertura y aporte de carbono al suelo que produce su rastrojo (Vanotti & Bundy, 1994). Para el maíz, si bien se han determinado

respuestas al agregado de otros nutrientes, el nitrógeno (N) es el elemento más relevante por ser el responsable, en la mayoría de las situaciones, de la determinación del rendimiento del cultivo en la Región Pampeana argentina (Sainz Rozas *et al.*, 2000; Andrade *et al.*, 2002). Por otro lado, se encuentra ampliamente citado en la biblio-

grafía que el azufre (S) se presenta como un nutriente de importancia creciente en los sistemas agrícolas, ya que su deficiencia ha sido reportada en numerosos trabajos internacionales (Sakal *et al.*, 2000; Weil Mughogho, 2000). Para la Región Pampeana norte y noreste es abundante la bibliografía que reporta casos de respuesta a S en maíz (Martínez & Cordone, 2000; Ferraris & Cuoretot, 2006), pero es escasa la información al respecto en el SE bonaerense (Echeverría, 2002) no obstante, es probable que también estén ocurriendo. Generalmente, la respuesta a S se presenta en lotes con bajos contenidos de MO, reducida estabilidad estructural, prolongada historia agrícola, indicios de erosión en el suelo y escasa o nula historia de fertilización azufrada (Ferraris *et al.*, 2004). Además, bajo sistemas de labranza conservacionista como la siembra directa (SD), numerosos trabajos han reportado que la disponibilidad de nutrientes disminuye con respecto al sistema de labranza convencional (LC) (Dowdell & Cannell, 1975; Echeverría, Sainz Rozas, 2001).

La eficiencia en el uso de nutrientes es un aspecto fundamental a tener en cuenta desde la perspectiva económica, ya que el beneficio de la fertilización está directamente relacionado con la cantidad de producto (grano) que se obtiene por unidad de insumo utilizada (fertilizante). Sin embargo, el conocimiento de dicha eficiencia presenta además relevancia ecológica, debido a que los nutrientes no utilizados por el cultivo y que no permanecen en el sistema suelo, corren el riesgo de ser lixiviados o emitidos a la atmósfera con negativas consecuencias ambientales (Zinder & Brulsema, 2007). Para el N, se han determinado eficiencias de uso del fertilizante nitrogenado (EUFN) que varían desde 4 a 54 kg de grano kg de N aplicado⁻¹ según dosis, nivel inicial de N, condiciones ambientales, tecnología de aplicación, etc. (Sainz Rozas *et al.*, 2004). En cuanto a S la información disponible es menor, no obstante, se han determinado eficiencias de uso del fertilizante azufrado (EUFS) de 43 a 135 kg de grano kg de S aplicado⁻¹ (Ventimiglia *et al.*, 2001). Sin embargo, no es abundante la información disponible de cómo la aplicación de un nutriente modifica la eficiencia de uso del otro. De todos modos, considerando que tanto N como S se encuentran involucrados en la síntesis de proteínas, algunos trabajos señalan que la falta de S reduciría la EUFN en los cultivos (Ceccoti, 1996). Probablemente la adición de S mejore la EUFN y viceversa.

El objetivo de este trabajo fue evaluar: 1) el efecto de la aplicación de N y S sobre el rendimiento y la EUFN y EUFS y 2) la conveniencia económica de la fertilización en diferentes ambientes de la provincia de Buenos Aires.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron cuatro experimentos en dos localidades de la Región Pampeana argentina durante las campañas 2005-06, 2006-07 y 2007-08. En la campaña 2005-06 se empleó un experimento de larga duración en la Estación Experimental INTA de Balcarce (37°45'S, 58°18'W; 130 m sobre el nivel del mar, 870 mm de lluvia media anual, y 13,7 °C de temperatura media anual) en adelante denominado Balcarce I (Bce I), mientras que en la campaña 2006-07 se realizaron dos experimentos, uno en el mismo sitio que el anterior, denominado Balcarce II (Bce II) y otro en la localidad de 9 de Julio (35° 27'S, 60° 53'W; 76 m sobre el nivel del mar, 990 mm de lluvia media anual, y 16 °C de temperatura media anual) denominado 9 de Julio I (9dJ I). Durante la campaña 2007-08 se condujo un cuarto experimento en 9 de Julio, en adelante denominado 9 de Julio II (9dJ II). Los suelos de los sitios experimentales fueron: Argiudol típico para Bce I y Bce II, Hapludol típico para 9dJ I y Hapludol éntico para 9dJ II. Los contenidos de MO, fósforo disponible y N de nitratos fueron determinados mediante los métodos de Walkley, Black (1934), Bray, Kurtz (1945) y Bremner, Keeney (1966), respectivamente. El S de sulfatos se extrajo con Ca(H₂PO₄)₂ (Islam, Bhuiyan, 1998) y se determinó por turbidimetría con BaCl₂ y Tween 80 como estabilizador (Johnson, 1987). Algunas características de los suelos de los tres experimentos a la siembra del maíz son presentadas en la Tabla 1. Los experimentos realizados en la localidad de Balcarce presentaron niveles de MO muy superiores a los que se realizaron en 9 de Julio, lo cual está relacionado con la granulometría más fina y con las menores temperaturas que tienen lugar en el primer sitio experimental. Con respecto al contenido de N inicial (bajo la forma de nitrato) se determinaron valores de 66, 88, 52 y 61 kg ha⁻¹ (0 a 60 cm de profundidad) para Bce I, Bce II, 9dJ I y 9dJ II, respectivamente. En cuanto al contenido de S inicial (bajo la forma de sulfato) se determinaron valores de 36, 31, 38 y 30 kg ha⁻¹ (0 a 60 cm de profundidad) para Bce I, Bce II, 9dJ I y 9dJ II, respectivamente. Todos los ensayos fueron fertilizados con 20-30 kg ha⁻¹ de fósforo (P), asegurando una elevada disponibilidad. La fuente de N, P y S fue urea granulada (46-0-0), superfosfato triple de calcio (0-20-0) y sulfato de calcio (20% S, 16% Ca), respectivamente.

En Bce I se empleó un diseño en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. El arreglo fue en parcelas divididas, en donde la parcela principal fueron dos sistemas de labranza convencional (LC) y directa (SD), y la subparcela cuatro tratamientos de fertilización. Estos últimos fueron: testigo (T), azufre (S), nitrógeno (N) y nitrógeno más azufre (NS); dichos nutrientes fueron agregados en cantidades no limitantes (N: 125 kg ha⁻¹ y S: 15 kg ha⁻¹). En Bce II, 9dJ I y 9dJ II, el sistema de labranza utilizado fue SD y se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados (tres repeticiones) con un arreglo factorial de los tratamientos. Los factores utilizados fueron N, con niveles de 0, 50 y 100 kg ha⁻¹ para Bce II y 0, 60, 120 kg ha⁻¹ para 9dJ I y 9dJ II; y S, con niveles de 0,8 y 16 kg ha⁻¹ para Bce I y 9dJ I y 0, 5, 10 y 20 kg ha⁻¹ para 9dJ II.

Al momento de la cosecha, se determinó el stand de plantas por parcela, se tomaron los tres surcos centrales y se recolectaron manualmente las espigas correspondientes a las plantas de los cinco metros centrales. La trilla se efectuó mediante trilladora estacionaria y se expresó el rendimiento en kg ha⁻¹ a 14% de humedad.

Se calculó la eficiencia de uso de N (EUFN) como el cociente entre la diferencia de rendimiento en grano del tratamiento fertilizado con N y el testigo, y la dosis de N aplicada. La EUFN fue calculada en forma individual para los distintos niveles de S. Análogamente, se calculó la eficiencia de uso de S (EUFS) como el cociente entre la diferencia de rendimiento en grano del tratamiento fertilizado con S y el testigo, y la dosis de S aplicada. Este índice se calculó individualmente para los distintos niveles de N. Por último, se calculó el retorno neto de la fertilización con N y S (RNFN y RNFS, respectivamente) de la siguiente manera:

$$RNF (\$ ha^{-1}) = [\text{incremento de rendimiento (kg ha}^{-1}) \times \text{precio neto grano (\$ kg}^{-1})] - [(\text{dosis de nutriente aplicado (kg ha}^{-1}) \times \text{precio nutriente (\$ kg}^{-1}) + \text{costo aplicación (\$ ha}^{-1})].$$

Además, se calculó el retorno por peso invertido en fertilizante con N y S (R\$IN y R\$IS, respectivamente) como:

$$R\$I (\$) = \frac{RNF}{[(\text{dosis de nutriente aplicado (kg ha}^{-1}) \times \text{precio nutriente (\$ kg}^{-1})].$$

Se consideraron precios promedio de los últimos 10 años para N (\$3,65 kg⁻¹), S (\$4,29 kg⁻¹) y grano de maíz neto (\$0,42 kg⁻¹) según información obtenida a partir de la serie de precios de AACREA 2008. El costo de aplicación de nutrientes se consideró como el equivalente a 8 kg de N.

Finalmente, se realizaron análisis de varianza utilizando el procedimiento GLM incluido en las rutinas del programa Statistical Analysis System (SAS Institute 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evolución de las precipitaciones

En Bce I, las precipitaciones registradas durante el ciclo del cultivo de maíz totalizaron 490 mm y casi el 50% del total ocurrieron desde el segundo decadio del mes de diciembre y el primero del mes de febrero (Fig. 1). Por lo tanto, la disponibilidad de agua no habría limitado en forma significativa el crecimiento del cultivo dado que solo se registraron ligeros eventos de estrés hídrico durante dicho período, en el cual la disponibilidad de agua es clave para la obtención de elevados rendimientos de maíz en seco (Calviño *et al.*, 2003). En Bce II, las precipitaciones totales durante el ciclo del cultivo alcanzaron 522 mm pero con una inadecuada distribución, ya que las precipitaciones no fueron abundantes durante los meses de enero y febrero, período coincidente con la fase crítica de determinación del rendimiento del cultivo de maíz (Fig. 1). Contrariamente, en 9dJ I se presentó una condición hídrica muy favorable para el crecimiento y rendimiento del cultivo, ya que las precipitaciones totalizaron 594 mm y con una adecuada distribución (Fig. 1). Finalmente, en 9dJ II las precipitaciones totales fueron de 453 mm y no fueron abundantes alrededor de floración, lo que condicionó el crecimiento del cultivo.

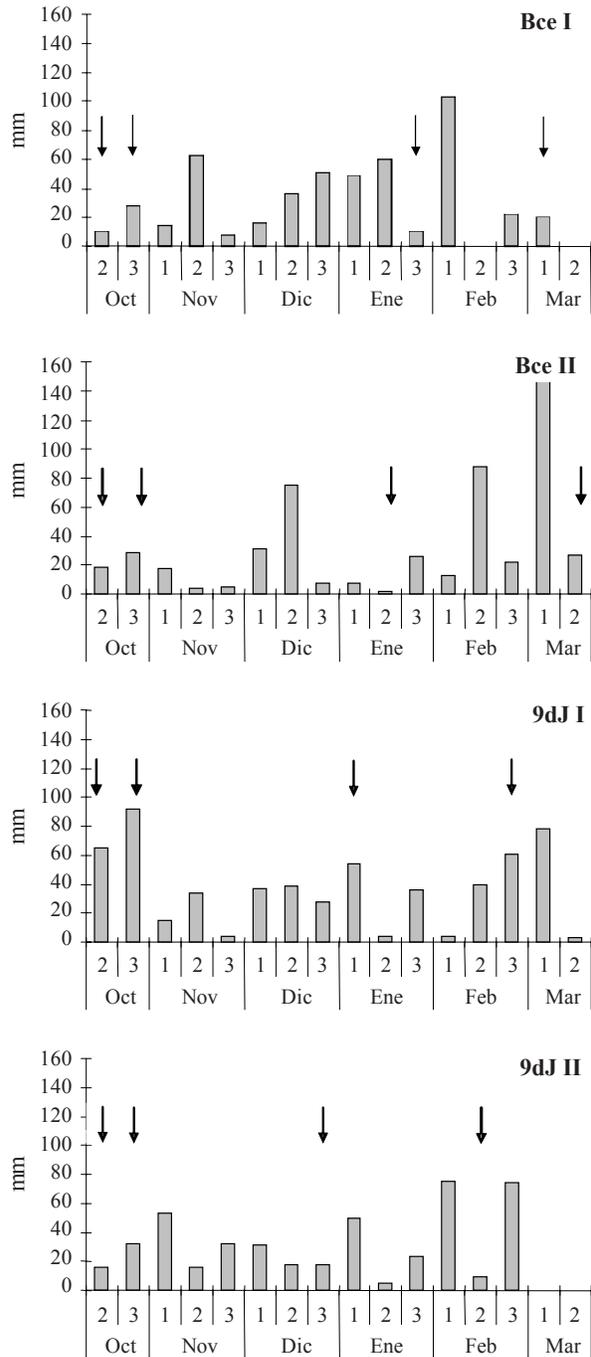


Figura 1. Precipitaciones durante el ciclo del cultivo para los cuatro experimentos. Las flechas indican los momentos de siembra, emergencia, floración y madurez fisiológica, respectivamente.

Figure 1. Precipitation during corn growth for the four experiments. Arrows indicate occurrence of planting, emergence, flowering and physiological maturity.

Rendimiento en grano

No se determinó interacción N-S sobre los rendimientos de ninguno de los cuatro ensayos. Estos resultados coinciden con los obtenidos en el norte de la provincia de Buenos Aires (Ferraris & Couretot, 2006). En otro trabajo realizado en Malawi, África, sobre suelos bajo severa deficiencia de S, se determinó interacción significativa N-S (Weil & Mughogho, 2000), pero con rendimientos máximos inferiores a 5.000 kg ha⁻¹.

En Bce I, los rendimientos variaron entre 8.000 y 12.000 kg ha⁻¹. Se registró efecto significativo del sistema de labranza ($p < 0,01$), siendo mayores los rendimientos bajo LC que bajo SD (10.687 y 9.502 kg ha⁻¹, respectivamente) (Fig. 2), resultados que coinciden con los de Echeverría & Sainz Rozas (2001). El efecto de N sobre los rendimientos fue el de mayor importancia ($p < 0,01$), con una respuesta promedio de 1.916 kg ha⁻¹ (Tabla 2), indicando que este nutriente es el que limitó en mayor medida el crecimiento del cultivo. Con respecto al S, si bien la respuesta no fue significativa, se observó un incremento promedio (a través de sistemas labranza) del rendimiento por el agregado de dicho nutriente de 400 kg ha⁻¹ (Tabla 3).

En Bce II, las reducidas precipitaciones alrededor del período crítico (Fig. 1) limitaron el rendimiento, ya que este osciló entre 8.185 y 9.386 kg ha⁻¹ (Fig. 2). A diferencia de lo ocurrido en Bce I, se registró efecto significativo de N y S ($p < 0,01$) siendo las respuestas medias de 382 y 682 kg ha⁻¹ para el agregado de 50 y 100 kg N ha⁻¹, respectivamente (Tabla 2); y de 499 y 697 kg ha⁻¹ para el agregado de 8 y 16 kg S ha⁻¹, respectivamente (Tabla 3). Las respuestas de magnitud similar a N y S se explicarían por la relativamente alta disponibilidad edáfica inicial de N (88 kg ha⁻¹ hasta 60 cm) y por la baja disponibilidad de S (31 kg ha⁻¹ hasta 60 cm) (Tabla 1).

En 9dJ I, los rendimientos variaron entre 9.742 y 15.399 kg ha⁻¹ (Fig. 2) hallándose efecto significativo de ambos nutrientes ($p < 0,01$), siendo las respuestas medias de 2.545 y 4.817 kg ha⁻¹ para el agregado de 60 y 120 kg N ha⁻¹, respectivamente (Tabla 2); y de 360 y 624 kg ha⁻¹ para el agregado de 8 y 16 kg S ha⁻¹, respectivamente (Tabla 3). Estos incrementos de rendimiento debidos a la adición de S coinciden con los reportados por otros autores en la Región Pampeana norte (Fontanetto *et al.*, 2000; Ventimiglia, 2005). Si bien en este experimento no se determinó efecto de interacción N x S ($p = 0,11$), se evidenció

Tabla 1. Información descriptiva de los sitios experimentales.

Table 1. Information describing experimental sites.

	Profundidad (cm)	MO (%)	pH (1:2,5)	P (mg kg ⁻¹)	N-NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ⁻² (mg kg ⁻¹)
Bce I	0 - 20	5,3(0,64)	5,9(0,31)	19,8(5,87)	13,3(2,2)	5,4(0,4)
	20 - 40	-	-	-	7,7(1,5)	4,5(1,1)
	40 - 60	-	-	-	5,7(0,5)	4,5(0,8)
Bce II	0 - 20	5,3(0,14)	5,3(0,12)	8,0(2,81)	14,8(1,56)	5,9(1,06)
	20 - 40	-	-	-	11,9(2,15)	4,4(0,62)
	40 - 60	-	-	-	9,0(1,00)	3,7(0,64)
9dJ I	0 - 20	2,8(0,48)	6,3(0,03)	9,0(3,48)	9,0(1,59)	5,3(1,02)
	20 - 40	-	-	-	7,2(1,40)	5,0(1,61)
	40 - 60	-	-	-	4,6(1,82)	5,0(0,26)
	60 - 80	-	-	-	4,8(1,72)	5,1(0,70)
	80 - 100	-	-	-	4,5(1,62)	5,6(0,45)
9dJ II	0 - 20	2,3(0,12)	6,4(0,56)	18,1(1,53)	10,5(1,13)	6,0(1,68)
	20 - 40	-	-	-	8,1(0,71)	2,7(0,38)
	40 - 60	-	-	-	6,1(0,28)	3,4(1,31)
	60 - 80	-	-	-	4,1(1,03)	4,2(3,34)
	80 - 100	-	-	-	3,0(0,95)	3,0(1,58)

MO: materia orgánica (Walkley, Black 1934), pH: determinado con electrodo de vidrio en suspensión de 1:2,5 suelo/agua, P: fósforo disponible (Bray, Kurtz, 1945), N-NO₃⁻: nitrógeno como nitrato, S-SO₄⁻²: azufre como sulfato. Los valores entre paréntesis indican los desvíos estándar.

MO: organic mater (Walkley, Black 1934), pH: determined with a glass electrode in a suspension of 1:2.5 soil/water ratio, P: available phosphorous (Bray, Kurtz, 1945), N-NO₃⁻: nitrogen as nitrate, S-SO₄⁻²: sulfur as sulfate. Bracketed values indicate standard errors.

una clara tendencia de aumento de rendimiento en la mayor dosis de N por el agregado de S (804 y 1.471 kg ha⁻¹ para la dosis de 8 y 16 kg S ha⁻¹, respectivamente), hecho que no ocurrió en los otros dos niveles de N. Este experimento presentó rendimientos muy superiores a los registrados en Bce I (Fig. 2), lo que puede haberse debido a diferencias entre los materiales genéticos utilizados y/o a la mayor estación de crecimiento que presenta la localidad de 9 de Julio en relación a la de Balcarce.

En 9dJ II, los rendimientos variaron entre 5.501 y 10.606 kg ha⁻¹ (Fig. 2) hallándose efecto significativo de ambos nutrientes ($p < 0,01$), siendo las respuestas medias de 1.440 y 3.661 kg ha⁻¹ para el agregado de 60 y 120 kg N ha⁻¹, respectivamente (Tabla 2); y de 541, 800 y 926 kg ha⁻¹ para el agregado de 5, 10 y 20 kg S ha⁻¹, respectivamente (Tabla 3).

Es interesante destacar el hecho de haber encontrado efectos aditivos de N y S sobre el rendimiento en los cuatro experimentos. La razón de no haber determinado interacción N-S probablemente se relacione con las moderadas deficiencias de N y S que se presentaron, sobre todo en Bce I y Bce II. Cuando el nivel de las deficiencias se incrementaron, como ocurrió en 9dJ I, se evidenciaron indicios de interacción entre ambos nutrientes ($p = 0,11$) que no fueron detectados con el nivel de significancia utilizado en este trabajo. Lo anterior estaría indicando que los alcances de estas conclusiones se restringen a ambientes en donde la deficiencia de ambos nutrientes sea de magnitud moderada a media. Probablemente, en ambientes de menor aporte de N y S edáfico se presente interacción entre ambos nutrientes, de acuerdo a lo reportado por Weil & Mughogho (2000).

Eficiencia de uso de N y S

La EUFN fue media en Bce I (entre 12,8 y 17,8 kg de grano kg de N aplicado⁻¹), errática y baja en Bce II (entre 2,5 y 16,1 kg de grano kg de N aplicado⁻¹), alta y estable en 9dJ I (entre 34,9 y 45 kg de grano kg de N aplicado⁻¹) y media-alta pero con menor estabilidad en 9dJ II (entre 18,1 y 34,5 kg de grano kg de N aplicado⁻¹) (Tabla 2). Probablemente, la escasa cantidad de precipitaciones que tuvieron lugar durante el período crítico del cultivo en Bce II, sumado a la relativamente alta disponibilidad de N inicial en el suelo (88 kg ha⁻¹), hayan condicionado la respuesta del maíz a la aplicación de N. Por otro lado, las elevadas EUFN determinadas en 9dJ I son consecuencia de las altas respuestas a la fertilización, producto de buenas condiciones hídricas y de una menor disponibilidad de N inicial (52 kg ha⁻¹). Barbieri *et al.* (2003) encontraron EUFN para el cultivo de maíz en Balcarce que variaron

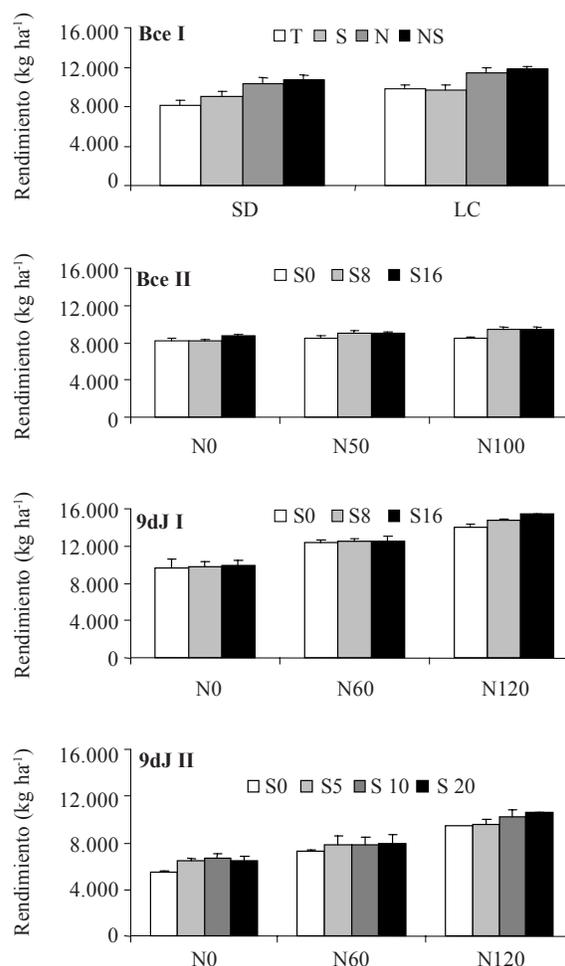


Figura 2. Rendimiento en grano (14% de humedad) en función del tratamiento (labranza/fertilización) para los cuatro experimentos. Las barras indican los errores estándar.

Figure 2. Grain yield (14% of humidity) as a function of the treatment (tillage/fertilization) for the four experiments. Error bars indicate standard error.

entre 30 y 49 kg de grano kg de N aplicado⁻¹ para la aplicación de 70 kg de N ha⁻¹. Dichos resultados fueron determinados ante baja disponibilidad de N inicial (43 y 56 kg ha⁻¹) y adecuadas condiciones de crecimiento, lo que posibilitó elevadas respuestas a la fertilización, al igual que lo ocurrido en 9dJ I.

Contrariamente a lo esperado, en ninguno de los tres experimentos se registraron reducciones significativas en la EUFN con el incremento de la dosis de N aplicada ($p > 0,3$), resultados que no coinciden con los de Blanco Fernández *et al.* (1998) quienes reportaron disminu-

Tabla 2. Respuesta a N, eficiencia de uso del nitrógeno aplicado (EUFN), retorno neto de la fertilización nitrogenada (RNFN) y retorno por \$ gastado en N (R\$IN) en función del tratamiento (labranza/fertilización) para cada uno de los cuatro experimentos.

Table 2. Nitrogen responses, applied N use efficiency (EUFN), net return to N fertilization (RNFN) and return per \$ invested in N (R\$IN) as a function of the tillage/fertilization treatment for each of the four experiments.

Experimento	Tratamiento		Respuesta a			
			N (kg ha ⁻¹)	EUFN (kg grano kg N apl. ⁻¹)	RNFN (kg ha ⁻¹)	R\$IN (\$)
Bce I	SD	T	-	-	-	-
	SD	S	-	-	-	-
	SD	N	2.222	18	456	1,00
	SD	NS	1.609	13	197	0,43
	LC	T	-	-	-	-
	LC	S	-	-	-	-
	LC	N	1.601	13	193	0,42
	LC	NS	2.230	18	460	1,01
Bce II	N0	S0	-	-	-	-
	N0	S8	-	-	-	-
	N0	S16	-	-	-	-
	N50	S0	177	4	-137	-0,75
	N50	S8	806	16	130	0,71
	N50	S16	226	5	-116	-0,64
	N100	S0	248	2	-289	-0,79
	N100	S8	1.201	12	115	0,31
	N100	S16	611	6	-136	-0,37
9dJ I	N0	S0	-	-	-	-
	N0	S8	-	-	-	-
	N0	S16	-	-	-	-
	N60	S0	2.565	43	839	3,83
	N60	S8	2.586	43	848	3,87
	N60	S16	2.485	41	805	3,67
	N120	S0	4.186	35	1.308	2,98
	N120	S8	4.863	41	1.594	3,64
	N120	S16	5.401	45	1.823	4,16
	9dJ II	N0	S0	-	-	-
N0		S5	-	-	-	-
N0		S10	-	-	-	-
N0		S20	-	-	-	-
N60		S0	1.800	30	515	2,35
N60		S5	1.368	23	332	1,51
N60		S10	1.085	18	212	0,97
N60		S20	1.508	25	391	1,78
N120		S0	3.967	33	1.214	2,77
N120		S5	3.054	25	827	1,89
N120		S10	3.483	29	1.009	2,30
N120		S20	4.139	34	1.287	2,94

Precio del maíz considerado: 530\$ t⁻¹, gastos de flete y comercialización: 21%, precio del N: 3.652\$ t⁻¹, costo de aplicación: el equivalente a 8 kg N ha⁻¹. Fuente: serie de precios AACREA, 2008.

Tabla 3. Respuesta a S, eficiencia de uso del S aplicado (EUFS), retorno neto de la fertilización azufrada (RNFS) y retorno por \$ gastado en S (RSIS) en función del tratamiento (labranza/fertilización) para cada uno de los cuatro experimentos.
 Table 3. Sulfur response, applied S use efficiency (EUFS), net return to S fertilization (RNFS) and return per \$ invested in S (RSIS) as a function of the tillage/fertilization treatment for each of the four experiments.

Experimento	Tratamiento		Respuesta a			
			N (kg ha ⁻¹)	EUFN (kg grano kg N apl. ⁻¹)	RNFS (kg ha ⁻¹)	RSIS (\$)
Bce I	SD	T	-	-	-	-
	SD	S	962	64	343	5,34
	SD	N	-	-	-	-
	SD	NS	349	23	84	1,30
	LC	T	-	-	-	-
	LC	S	-175	-12	-139	-2,15
	LC	N	-	-	-	-
	LC	NS	454	30	128	1,99
Bce II	N0	S0	-	-	-	-
	N0	S8	-49	-6	-55	-1,60
	N0	S16	539	34	160	2,33
	N50	S0	-	-	-	-
	N50	S8	581	73	212	6,18
	N50	S16	588	37	181	2,63
	N100	S0	-	-	-	-
	N100	S8	904	113	349	10,17
N100	S16	901	56	313	4,57	
9dJ I	N0	S0	-	-	-	-
	N0	S8	127	16	20	0,57
	N0	S16	256	16	40	0,58
	N60	S0	-	-	-	-
	N60	S8	148	19	29	0,83
	N60	S16	176	11	6	0,09
	N120	S0	-	-	-	-
	N120	S8	804	100	307	8,93
N120	S16	1471	92	555	8,09	
9dJ II	N0	S0	-	-	-	-
	N0	S5	989	198	398	18,56
	N0	S10	1.200	120	466	10,86
	N0	S20	966	48	324	3,78
	N60	S0	-	-	-	-
	N60	S5	557	111	215	10,02
	N60	S10	485	49	163	3,80
	N60	S20	674	34	200	2,33
	N120	S0	-	-	-	-
	N120	S5	76	15	11	0,51
	N120	S10	716	72	261	6,08
	N120	S20	1.138	57	397	4,63

Precio del maíz considerado: 530\$ t⁻¹, gastos de flete y comercialización: 21%, precio del S: 4.289\$ t⁻¹. Fuente: serie de precios AACREA, 2008.

nes en la EUFN del maíz, a medida que la oferta de este nutriente se incrementaba. En este sentido, Pikul *et al.* (2005) encontraron que la EUFN caía de 70 a 35 kg de grano kg de N aplicado⁻¹ cuando la dosis de N aplicada aumentaba de 59 a 126 kg de N ha⁻¹. Por otro lado, el agregado de S, en general no mejoró significativamente la EUFN ($p > 0,2$). Sólo en 9dJ I, donde se evidenciaron indicios de interacción, se presentó una tendencia de mejora en la EUFN debida a la aplicación de S pero únicamente en la mayor dosis de N aplicada (Tabla 2). Esto concuerda con los resultados de Fismes *et al.* (2000) quienes encontraron que el agregado de S mejoraba la EUFN en el cultivo de colza.

La EUFS presentó mayor variabilidad que la EUFN ya que los rangos oscilaron entre -12 y 64 kg de grano kg de S aplicado⁻¹ en Bce I, entre -6 y 113 kg de grano kg de S aplicado⁻¹ en Bce II, entre 11 y 100 kg de grano kg de S aplicado⁻¹ en 9dJ I, y entre 15 y 198 kg de grano kg de S aplicado⁻¹ en 9dJ II (Tabla 3). En Bce I y 9dJ II, la aplicación de N no mejoró consistentemente la EUFS ($p > 0,2$), en concordancia con los resultados de Cordone *et al.* (2001), pero en Bce II y 9dJ I se evidenció una mejora en dicha variable a medida que aumentaba la disponibilidad de N. Al igual que lo ocurrido con la EUFN, la dosis de S aplicada no pareció influir sobre la EUFS ($p > 0,35$) (Tabla 3). Fontanetto *et al.* (2000) informaron que la EUFS fue de 67, 69, y 48 kg de grano kg de S aplicado⁻¹ para la aplicación de 6, 12 y 24 kg S ha⁻¹, respectivamente.

Análisis económico

El RNFN varió entre 197 y 460\$ ha⁻¹ en Bce I, entre -289 y 130\$ ha⁻¹ en Bce II, entre 805 y 1.823\$ ha⁻¹ en 9dJ I, y entre 212 y 1.287\$ ha⁻¹ en 9dJ II (Tabla 2). Con los precios considerados, se estableció una relación de precios N-grano de maíz (kg de maíz necesarios para pagar 1 kg de N) de 8,6. De esta manera, sólo se establecieron RNFN positivos cuando la EUFN fue superior a la relación de precios mencionada. Por ejemplo, en Bce II, donde las condiciones hídricas limitaron severamente la respuesta del cultivo a la aplicación de N, en general se establecieron EUFN bajas o negativas que derivaron en que no sea rentable la fertilización con las dosis utilizadas ya que el R\$IN varió entre -0,79 y 0,71\$ (Tabla 2). Por otro lado, en la localidad de 9 de Julio se presentaron importantes respuestas a la fertilización nitrogenada, haciendo que dicha práctica resulte económicamente muy conveniente. En este experimento el R\$IN presentó valores positivos a través de las dosis utilizadas y osciló entre 2,98 y 4,16\$ (Tabla 2). Situaciones intermedias se determinaron en Bce I y 9dJ II con rangos de R\$IN de 0,42 y 1,1\$; y 0,97 y 2,94, respectivamente (Tabla 2).

El RNFS presentó mayor variabilidad que el RNFN, con rangos que oscilaron entre -139 y 343\$ ha⁻¹ en Bce I, entre -55 y 349\$ ha⁻¹ en Bce II, entre 6 y 555\$ ha⁻¹ en 9dJ I, y entre 11 y 466\$ ha⁻¹ en 9dJ II (Tabla 3). En este caso, se estableció una relación de precios S-grano de maíz de 10,1 (kg de maíz necesarios para pagar 1 kg de S) por lo que sólo fue económicamente conveniente aplicar S cuando la EUFS superó este valor. El R\$IS fue bajo en Bce I (entre -2,15 y 5,34\$), intermedio en Bce II y 9dJ I (entre -1,6 y 10,17; y entre 0,09 y 8,93\$, respectivamente), y alto en 9dJ II (entre 0,51 y 18,56\$) (Tabla 3). Cabe aclarar que el carácter errático del éxito de la fertilización azufrada radica en que no en todos los ambientes se registra una respuesta de magnitud considerable en el cultivo de maíz, a diferencia de lo que ocurre con el N. Por lo tanto, y a pesar del relativamente bajo costo del S, será necesario seguir explorando las deficiencias de S en las diferentes zonas productivas a fin de aportar mayor certidumbre a la hora de realizar recomendaciones de fertilización azufrada.

Se concluye que la respuesta del maíz al agregado de S no estuvo condicionada por la nutrición nitrogenada del cultivo, al menos ante los niveles de estrés de N y S que se presentaron en este trabajo. Sin embargo, en dos de los cuatro experimentos, el agregado de N mejoró la EUFS. La rentabilidad de la fertilización fue variable pero estuvo relacionada con la potencialidad del ambiente y con la oferta inicial de ambos nutrientes. El resultado económico de la fertilización con N y S resultó favorable sólo en los ambientes que permitieron elevada respuesta a la fertilización.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración para poder realizar los ensayos de: Norma Pedemonte y flia., Carlos Garpari, Juan Carlos Pagani, Pedro y Lorenzo Rolando. Este trabajo fue financiado por el proyecto INTA AERN5656, el AGR 261/08 de la FCA-UNMP y con recursos de la Est. Exp. INTA Balcarce.

REFERENCIAS

- Andrade, FH; HE Echeverría; NS González & SA Uhart. 2002. Capítulo 8: Requerimientos de nutrientes minerales. *En: Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja.* EEA INTA Balcarce-Fac. de Ciencias Agrarias UNMP. pp. 211-237.
- Barbieri, PA; HE Echeverría & HR Sainz Rozas. 2003. Respuesta del cultivo de maíz bajo siembra directa a la fuente y al método de aplicación de nitrógeno. *Ciencia del Suelo* 21: 18-23.
- Blanco Fernández, L. 1998. Variación en la eficiencia de uso del nitrógeno en maíz ante cambios en la oferta de nitrógeno: mecanismos involucrados. Tesis de Magister. UNMP.

- Bray, RH & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphate in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Bremner, J & D Keeney. 1966. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soil: 3. Exchangeable ammonium, nitrate and nitrite by extraction-distillation methods. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30: 577-582.
- Calviño, PA; FH Andrade & VO Sadras. 2003. Maize Yield as Affected by Water Availability, Soil Depth, and Crop Management. *Agron. J.* 95: 275-281.
- Ceccoti, SP. 1996. Plant nutrient sulphur a review of nutrient balance. *Environment impact and fertilizers* 43: 117-125.
- Cordone, GF; F Martínez; J Capurro & R Abrate. 2001. Fertilización de maíz con nitrógeno y azufre en el centro-sur de la provincia de Santa Fe. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- Dowdell, RJ & RQ Cannell. 1975. Effect of plowing and direct drilling on soil nitrate contents. *J. Soil Sci.* 26: 53-61.
- Echeverría, HE. 2002. Exploración de deficiencias de azufre en sistemas productivos del sudeste bonaerense. Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce. *Boletín Técnico N° 156* 19 p.
- Echeverría, HE & HR Sainz Rozas. 2001. Eficiencia de recuperación del nitrógeno aplicado al estadio de seis hojas del maíz bajo riego en siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del Suelo* 19: 57-66.
- Ferraris, GN & LA Couretot. 2006. Evaluación de diferentes dosis y momentos de aplicación de nitrógeno y su interacción con el azufre utilizando fuentes líquidas en el Norte de la Provincia de Buenos Aires. *En: Maíz en siembra directa. Revista técnica AAPRESID* pp. 70-73.
- Ferraris, GN; F Salvagiotti; P Prysypa & FH Gutierrez Boem. 2004. Disponibilidad de azufre y respuesta de la soja de primera a la fertilización. *En: 19° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (Paraná, 2004, jun, 22-25) AACs, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos, Argentina.* 144 p.
- Fismes, J; PC Vong; A Guckert & E Frossard. 2000. Influence of sulfur on apparent N-use efficiency, yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown on a calcareous soil. *European J. of Agron.* 12: 127-141.
- Fontanetto, H; O Keller; R Inwinkelried; N Citroni & F García. 2000. Phosphorus and Sulfur Fertilization of Corn in the Northern Pampas. *Better Crops* 14: 1-5.
- Islam, M & N Bhuiyan. 1998. Evaluation of various extractants for available sulfur in wetland rice (*Oryza sativa*) soils of Bangladesh. *Indian J. of Agric. Sci.* 58: 603-606.
- Johnson, GV. 1987. Sulfate: Sampling testing, and calibration. *En: Brown, JR. Ed. Soil testing: Sampling correlation, calibration and interpretation.* SSSA, Madison, WI. Spec. Publ. 21. pp. 89-96.
- Martínez, F & G Cordone. 2000. Avances en el manejo del azufre: novedades en respuesta y diagnóstico en trigo, soja y maíz. *En: Jornada de actualización para profesionales (Rosario, Santa Fe, 2000, abr 17).* pp. 28-30.
- Pikul, JL; L Hammack & WE Riedell. 2005. Corn yield, nitrogen use, and corn rootworm infestation of rotations in the northern corn belt. *Agron. J.* 97: 854-863
- Sainz Rozas, HR; HE Echeverría & PA Barbieri. 2004. Nitrogen Balance as Affected by Application Time and Nitrogen Fertilizer Rate in Irrigated No-Tillage Maize. *Agron. J.* 96: 1622-1631.
- Sainz Rozas, HR; HE Echeverría; GA Studdert & G Domínguez. 2000. Evaluation of pre-sidedress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. *Agron. J.* 92: 1176-1183.
- Sakal, R; AP Singh; RB Sinha & M Ismail. 2000. Relative performance of some sulphur sources on sulphur nutrition of crops in calcareous soil. *An. of Agric. Res.* 21: 206-211.
- Snyder, CS & TW Bruulsema. 2007. Nutrient use efficiency and effectiveness in North America: indices of agronomic and environmental benefit. International Plant Nutrition Institute.
- SAS Institute Inc. 1988. [CD-ROM]: Versión SAS/STAT. Users Guide. INC, Cary. Programa computacional.
- Vanotti, MB & LG Bundy. 1994. An alternative rationale for corn nitrogen fertilizer recommendation. *J. Prod. Agric.* 7: 243-249.
- Ventimiglia, LA; H Carta & S Rillo. 2001. Respuesta del maíz al azufre: Resultados de tres años de experiencias a campo. Experimentación en campos de productores. Campaña 2000/01. UEEA INTA 9 de Julio. Buenos Aires, Argentina.
- Ventimiglia, LA. 2005. Nutrición de cultivos en el centro de Buenos Aires. Nutrición, producción y ambiente. *En: Simposio Fertilidad 2005 (Rosario, Santa Fé, 2005, abr 27-28).* INPOFOS y Fertilizar Asociación Civil. Rosario, Buenos Aires, Argentina. pp. 56-61.
- 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.
- Weil, RR & SK Mughogho. 2000. Sulfur Nutrition of Maize in Four Regions of Malawi. *Agron. J.* 92: 649-656.