

# EFFECTO DE FUENTES DE AZUFRE SOBRE EL RENDIMIENTO Y CALIDAD DE TRIGO Y PRADERA EN DOS ANDISOLES

## Effect of sulphur source effect on yield and quality of wheat and pasture in two andisols

Marta Alfaro<sup>1\*</sup>, René Bernier<sup>1</sup> y Sergio Iraira<sup>1</sup>

### ABSTRACT

Two experiments were carried out to evaluate the effect of source and rate of sulphur (S) on yield and quality of a wheat (*Triticum aestivum* L.) crop and a permanent naturalized pasture in southern Chile. In the wheat trial, calcium sulphate (SCA) and magnesium sulphate (SMG) were tested (45 and 90 kg S ha<sup>-1</sup>). In the pasture trial, an additional potassium-magnesium sulphate (SKMG) treatment was considered. In both trials fertilizers were sprayed and a control treatment was included. In the wheat trial all aspects affecting yield components were evaluated: yield, nitrogen (N), phosphorus (P) and S concentration in plants and seed, and albumen quality. In the pasture trial, the yield and nutritional quality (foliar concentration of N, P, S energy and "D" value) were evaluated. In wheat, S addition corrected soil deficiency but did not increase yield neither the quality ( $P > 0.05$ ). In pasture, soil-S contribution and the type of the pasture employed masked the effect on yield and quality of the S-fertilizer added. No effect of the S source was found for the correction of soil S deficiency ( $P > 0.05$ ) in the crop, or the pasture trial. Sulphur application increased plant P uptake. The application of S in deficient soils is necessary to compensate for the estimation of negative gate budgets balances in the control treatments (-13 and -18 kg S ha<sup>-1</sup>). More studies are needed to establish the role of soil-S and leaching on S dynamics in andisols.

**Key words:** protein, digestibility, gluten, nutrient budgets balances.

### RESUMEN

Se realizaron dos experimentos para evaluar el efecto de la fuente y dosis de azufre (S) en el rendimiento y calidad de trigo (*Triticum aestivum* L.) y de una pradera permanente naturalizada, en el sur de Chile. En el ensayo de trigo se compararon sulfato de calcio (SCA) y sulfato de magnesio (SMG) (45 y 90 kg S ha<sup>-1</sup>). En el ensayo de pradera, además se evaluó sulfato doble de potasio y magnesio (SKMG). Los fertilizantes fueron aplicados en cobertera y se incluyó un tratamiento control. En trigo se evaluaron los componentes del rendimiento: el rendimiento, la concentración de nitrógeno (N), fósforo (P) y S en la planta y el grano y la calidad del gluten. En pradera se evaluó el rendimiento y calidad nutricional (concentración foliar de N, P, S, energía y valor "D"). En trigo, el S corrigió la deficiencia edáfica, pero no incrementó la calidad ni el rendimiento ( $P > 0,05$ ). En pradera, el S edáfico y el tipo de pradera empleada enmascararon el efecto del S-fertilizante en el rendimiento y calidad de la misma. En ambos, no hubo diferencia entre fuentes para la corrección de la deficiencia edáfica de S ( $P > 0,05$ ). La aplicación de S incrementó la extracción de P. La aplicación de S en suelos deficientes es necesaria para compensar la obtención de balances de puerta negativos en los tratamientos control (-13 y -18 kg S ha<sup>-1</sup>). Se necesitan más estudios para establecer el rol del S edáfico y la lixiviación en la dinámica del S en andisoles.

**Palabras clave:** proteína, digestibilidad, gluten, balances de nutrientes.

---

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Remehue, Casilla 24-O, Osorno, Chile.

Email: malfaro@inia.cl \*Autor para correspondencia.

Recibido: 28 de junio de 2005. Aceptado: 8 de agosto de 2005.

## INTRODUCCIÓN

El azufre (S) es un elemento esencial para el desarrollo y mantención de las plantas (Nguyen y Goh, 1992). Las plantas absorben el S principalmente en la forma de sulfato, a pesar de que en el suelo no más del 10% del S se encuentra en esta forma, estando mayoritariamente en forma orgánica (Watkinson y Kear, 1996).

El S absorbido es rápidamente incorporado a la molécula de cisteína, que con posterioridad puede ser transferida hasta formar metionina. Estos dos aminoácidos son la principal fuente de S en las plantas, de manera tal que su deficiencia produce la inhibición de la síntesis proteica, por lo que la deficiencia de S reduce el rendimiento y la calidad de los cultivos (Mengel y Kirkby, 1987). La disponibilidad de S en el suelo en niveles no limitantes para el desarrollo de los cultivos, mejora la eficiencia de uso de N aplicado como fertilizante (Zia *et al.*, 1999), porque por cada 14 partes de nitrógeno (N) empleadas en la formación de aminoácidos, se requiere de una parte de S (Nguyen y Goh, 1992). La absorción de S y fósforo (P) también se encuentra íntimamente relacionada, de manera tal que la deficiencia de uno de estos elementos limita el aporte del suelo y la absorción del otro (Mora *et al.*, 2002).

En praderas, la deficiencia de S se relaciona con la ausencia de trébol blanco (*Trifolium repens* L.), con menores contenidos proteicos (Williams y Haynes, 1990) y menores rendimientos (Mora *et al.*, 2002). En trigo (*Triticum aestivum* L.), el incremento del contenido proteico del grano y, específicamente, de su contenido de aminoácidos azufrados, puede representar una alternativa para mejorar la calidad nutricional del grano utilizado en la fabricación panadera destinado a alimentación humana, o para alimentación de salmonídeos.

El S se encuentra disponible como fertilizante en su forma elemental, de entrega lenta en el tiempo y cuya transformación a sulfato puede generar bajas en el pH del suelo. También el S existe disponible como sulfato (de calcio, magnesio, de calcio y magnesio), de disponibilidad rápida para el cultivo, pero que podría perderse desde el suelo por lixiviación (Janzen y Bettany, 1986).

En los suelos del sur de Chile, el S es un elemento frecuentemente deficitario debido a que ya no se

utilizan fertilizantes portadores de azufre (*i.e.*, superfosfato normal), se utilizan forrajeras y cultivos de mayor potencial de rendimiento y se utilizan mayores dosis de nitrógeno en la fertilización. El S también puede ser perdido por lixiviación, debido a la alta precipitación de la zona. En suelos andisoles de la Región de Los Lagos, un 76% (n = 637) presentaba niveles de S bajos a muy bajos,  $\leq 12$  mg kg<sup>-1</sup> (Alfaro, 1999). Datos no publicados del Laboratorio de Diagnóstico Nutricional de Suelos y Plantas del Instituto de Investigaciones Agropecuarias, ubicado en Chillán, indican que del total de muestras colectadas a 0-10 cm y analizadas en el año 2005 (andisoles y otros, n = 929), un 77% se mantenía en este rango de deficiencia. En el caso de muestras de suelo colectadas de 0-20 cm (n = 604), un 66% presentaron niveles de S bajos a muy bajos.

En Chile existen pocos trabajos tendientes a determinar el efecto del uso de S en cultivos y praderas, y estos están enfocados a conocer su efecto en el suelo y en el rendimiento más que en la calidad nutricional de los mismos (Baeza, 2001; Aguilera *et al.*, 2002; Mora *et al.*, 2002). El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la fuente de S utilizada sobre el rendimiento y la calidad de un cultivo de trigo y de una pradera mejorada. La hipótesis de este trabajo fue que el uso de fuentes solubles de S representa una alternativa para incrementar la concentración proteica del grano de trigo y la calidad nutricional de praderas naturales fertilizadas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Trigo

El experimento se realizó durante la temporada 2003-2004, en un andisol de la Serie Piedras Negras (Acrodoxic Hydric Melanudands; CIREN, 2003), en las cercanías de Río Bueno, Décima Región (40°18' lat. Sur, 72°41' long. Oeste, 197 msnm). El análisis químico de suelos realizado por bloque, al inicio del experimento (0-20 cm) mostró un nivel medio de fertilidad, ausencia de problemas de acidez y baja saturación de aluminio. El contenido inicial de S fue bajo (Cuadro 1).

Los tratamientos evaluados fueron sulfato de calcio y sulfato de magnesio, en dosis de 45 y 90 kg S ha<sup>-1</sup> (SCA45, SCA90, SMG45 y SMG90, respectivamente), además de un tratamiento control (C), sin aplicación de S. Los tratamientos se distribuyeron aleatoriamente en un diseño de bloques completos

**Cuadro 1.** Análisis de suelo inicial (12/10/2003) y final (19/03/2004) para el uso de distintas fuentes y dosis de azufre en un cultivo de trigo invernal (*Triticum aestivum* L.) cv. Otto, en un andisol de la Serie Piedras Negras (0-20 cm). n = 4, ± eem.

**Table 1.** Initial (13/11/2003) and final (19/03/2004) soil chemical analysis after the use of different sulphur rates doses and sources on a winter wheat crop (*Triticum aestivum* L.) cv. Otto in an andisol of the Piedras Negras soil series (0-20 cm). n = 4, ± sem.

Variable	Inicial	Final				
		C	SCA45	SCA90	SMG45	SMG90
Fósforo, mg kg <sup>-1</sup>	14 ± 0,8	25 ± 3,5 a	23 ± 0,9 a	29 ± 3,1 a	29 ± 1,9 a	20 ± 2,1 a
Nitrógeno, mg kg <sup>-1</sup>	22 ± 1,6	22 ± 1,2 a	28 ± 4,0 a	24 ± 4,4 a	22 ± 1,5 a	21 ± 2,5 a
pH al agua	6,3 ± 0,04	6,1 ± 0,09 a	6,2 ± 0,02 a	6,2 ± 0,04 a	6,1 ± 0,03 a	6,1 ± 0,02 a
Azufre, mg kg <sup>-1</sup>	13 ± 1,2	10 ± 1,5 b	17 ± 2,0 b	31 ± 8,3 a	24 ± 2,8 ab	24 ± 2,5 ab
Calcio, cmol (+) kg <sup>-1</sup>	9,7 ± 0,48	8,9 ± 0,71 a	9,2 ± 0,31 a	10,0 ± 0,57 a	8,5 ± 0,54 a	8,8 ± 0,11 a
Magnesio, cmol (+) kg <sup>-1</sup>	1,6 ± 0,19	1,5 ± 0,30 b	1,8 ± 0,12 a	1,8 ± 0,30 a	1,7 ± 0,21 a	2,1 ± 0,11 a
Suma de bases, cmol (+) kg <sup>-1</sup>	11,9 ± 0,68	11,2 ± 1,04 a	12,1 ± 0,21 a	12,8 ± 0,58 a	11,8 ± 1,06 a	11,7 ± 0,53 a
Saturación de aluminio, %	0,06 ± 0,013	0,2 ± 0,04 a	0,1 ± 0,02 a	0,2 ± 0,02 a	0,2 ± 0,01 a	0,1 ± 0,02 a
Aluminio extractable, mg kg <sup>-1</sup>	871 ± 61,0	1305 ± 68,3 a	1320 ± 48,7 a	1255 ± 123,7 a	1262 ± 58,3 a	1335 ± 77,4 a

Letras diferentes en filas de resultados finales indican diferencias significativas entre tratamientos, al final del período experimental (P ≤ 0,05)

C: sin aplicación de S; SCA45: 45 kg S ha<sup>-1</sup>, sulfato de calcio; SCA90: 90 kg S ha<sup>-1</sup>, sulfato de calcio; SMG45: 45 kg S ha<sup>-1</sup>, sulfato de magnesio; SMG90: 90 kg S ha<sup>-1</sup>, sulfato de magnesio  
eem: error estándar de la media

al azar con cuatro repeticiones, en parcelas de 18 m<sup>2</sup> (6 x 3 m). Los tratamientos con sulfato de calcio (SCA45 y SCA90) recibieron además la aplicación de magnesio (Mg), en dosis de 45 y 90 kg Mg ha<sup>-1</sup> (MgO, 80%).

El trigo (*Triticum aestivum* L.) cv. Otto, se sembró el 12/10/2003 en dosis de 220 kg ha<sup>-1</sup>, sobre una cama de semilla preparada de manera tradicional en un precultivo de manzanos (*Malus domestica*). La fertilización a la siembra incluyó 39 kg N ha<sup>-1</sup>, 165 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, 55 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> y 66 kg CaO ha<sup>-1</sup> (mezcla comercial preparada individualmente). La aplicación de S coincidió con la aplicación de N postsiembra (12 y 13/11/2003, respectivamente) 161 kg N ha<sup>-1</sup> a la forma de urea (46%); se aplicó en cobertera 1 mes posterior a la siembra. El control de malezas se realizó el 11/11/2003, con MCPA amina, en dosis de 1 L ha<sup>-1</sup> (MCPA 750 SL) y Alquil aril poliglicol eter, en dosis de 50 mL ha<sup>-1</sup> (Cittowet). La cosecha se realizó el 19/03/2004 con máquina automática.

Durante el desarrollo del cultivo se evaluó el número de plantas y macollos por metro lineal (Nº m<sup>-1</sup>, hoja bandera, 26/11/2003), la concentración foliar de N (Kjeldahl; AOAC, 1970) y S en la planta (%; 18/12/2003) (turbidimetría; Chaudhry y Cornfield, 1971) y el número de espigas por unidad de super-

ficie (Nº m<sup>-2</sup>). A la cosecha se evaluó el número de granos por espiga (Nº espiga<sup>-1</sup>), el rendimiento (t ha<sup>-1</sup>) y el índice de cosecha (IC; %). Del material cosechado por parcela, una submuestra de 1 kg se utilizó para determinar la concentración de N, S y P (espectrofotometría visual; Sadzawka, 1990) en el grano (gr), su peso hectolitro y el peso de 1000 gramos. De esta submuestra, 200 g se enviaron a un laboratorio comercial para análisis del porcentaje de gluten (%) y la determinación del Gluten Index. A la cosecha se realizó un análisis químico de suelo por parcela (0-20 cm), para verificar el efecto de la fuente y dosis de S sobre los parámetros químicos de suelo (P Olsen, pH al agua, suma de bases (Ca, Mg, Na, K), Al extractable, S y saturación de Al), de acuerdo a las metodologías descritas por Sadzawka *et al.* (2004).

### Pradera

El ensayo se realizó en el Centro Regional de Investigación Remehue, dependiente del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (40°55' lat. Sur, 73°08' long. Oeste, 78 msnm), en un andisol de la Serie Osorno (Typic Hapludands; CIREN, 2003), entre el 15 de septiembre del 2003 y el 14 de mayo del 2004. Previo al inicio del ensayo se realizó un análisis químico de suelo (15/09/2003), por bloque (0-10 cm), el cual arrojó un nivel de fertilidad medio, con una muy baja concentración de S (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Análisis químico de suelo inicial (15/09/2003) y final (14/05/2004), luego de la aplicación de distintas fuentes de fertilizante azufrado sobre una pradera naturalizada, en un andisol de la Serie Osorno (0-10 cm). n = 4, ± eem.**

**Table 2. Initial (15/09/2003) and final (14/05/2004) soil chemical analysis, after the use of different sources of sulphur fertilizer on a naturalized pasture, in an andisol of the Osorno soil series (0-10 cm). n = 4, ± sem.**

Variable	Inicial	Final			
		C	SMG	SCA	SKMG
Fósforo, mg kg <sup>-1</sup>	4 ± 0,1	5 ± 0,5 a	5 ± 0,4 a	6 ± 0,6 a	5 ± 0,3 a
Nitrógeno, mg kg <sup>-1</sup>	22 ± 1,1	16 ± 0,4 a	15 ± 0,6 a	14 ± 0,1 a	14 ± 0,8 a
pH al agua	5,8 ± 0,03	5,6 ± 0,03 a	5,6 ± 0,03 a	5,6 ± 0,02 a	5,5 ± 0,06 a
Azufre, mg kg <sup>-1</sup>	2 ± 0,06	13 ± 4,9 b	29 ± 0,9 a	31 ± 4,0a	34 ± 2,7 a
Calcio, cmol (+) kg <sup>-1</sup>	7,6 ± 0,33	6,1 ± 0,81 a	6,0 ± 0,71 a	6,8 ± 0,55 a	5,7 ± 0,71 a
Magnesio, cmol (+) kg <sup>-1</sup>	2,4 ± 0,06	2,4 ± 0,36 ab	3,1 ± 0,25 a	2,0 ± 0,11 c	2,6 ± 0,28 bc
Suma de bases, cmol (+) kg <sup>-1</sup>	10,9 ± 0,36	9 ± 1,1 a	10 ± 0,9 a	10 ± 0,6 a	9 ± 1,1 a
Saturación de aluminio, %	1,0 ± 0,09	2,2 ± 0,59 a	2,0 ± 0,62 a	1,7 ± 0,26 a	2,4 ± 0,55 a
Aluminio extractable, mg kg <sup>-1</sup>	1135 ± 58,6	1147 ± 55,6 a	1080 ± 21,4 a	1121 ± 35,8 a	1191 ± 59,7 a

Letras diferentes en filas de resultados finales indican diferencias significativas entre tratamientos, al final del periodo experimental (P ≤ 0,05).

C: sin aplicación de S; SMG: 90 kg S ha<sup>-1</sup>, sulfato de magnesio; SCA: 90 kg S ha<sup>-1</sup>, sulfato de calcio; SKMG: 90 kg S ha<sup>-1</sup>, sulfato doble de potasio y magnesio.

eem: error estándar de la media

La pradera permanente utilizada era naturalizada, con predominancia de pasto miel (*Holcus lanatus* L.), chéptica (*Agrostis tenuis* Sibth) y bromo (*Bromus catharticus* Vahl). La pradera se manejó bajo corte, dejando una altura de residuo de 5 cm. Se evaluó la aplicación de 90 kg S ha<sup>-1</sup> aplicado como sulfato de magnesio (SMG), sulfato de calcio (SCA) y sulfato doble de potasio y magnesio (SKMG), además de un tratamiento control, sin aplicación de S (C). Los tratamientos se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y parcelas de 24 m<sup>2</sup> (6 x 4 m). Todos los tratamientos recibieron una fertilización base (26/09/2003) consistente en 90 kg N ha<sup>-1</sup> (urea, 46% N), 44 kg P ha<sup>-1</sup> (SFT, 46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y 41 kg K ha<sup>-1</sup> (muriato de potasio, 60% K<sub>2</sub>O). El tratamiento SCA recibió además la aplicación de 90 kg Mg ha<sup>-1</sup> (óxido de magnesio, 80% MgO). Se realizó una segunda aplicación de N (06/11/2003), consistente en 30 kg N ha<sup>-1</sup> (urea, 46% N), en todos los tratamientos.

El rendimiento de la pradera se expresó por corte y acumulado para el período (kg MS ha<sup>-1</sup>). La calidad del forraje generado se evaluó a través de su digestibilidad (valor "D") (Tilley y Terry, 1963) y energía metabolizable (EM). El valor D corresponde a la digestibilidad de la materia orgánica en la materia seca del forraje, determinada *in vitro*. Además se determinó la concentración foliar de N, P y S, de acuerdo a las metodologías ya descritas para análisis de grano.

Al final del período experimental se realizó un análisis químico de suelo por parcela (14/05/2004). Los parámetros químicos evaluados y las metodologías de análisis empleadas se indicaron previamente.

#### **Eficiencia de uso del fertilizante azufrado y balances de nutrientes**

Tanto en el ensayo de trigo como de pradera se estimó la eficiencia aparente del S aplicado como fertilizante, esto es, el incremento en la concentración de S en el suelo (mg kg<sup>-1</sup>), descontado el aporte del suelo (tratamiento C), en relación a la cantidad de S aplicado como fertilizante. También se estimaron los balances de puerta para ambos cultivos, esto es, la diferencia aritmética entre los nutrientes (N, P, S) extraídos en grano y producción de forraje (kg nutriente extraído ha<sup>-1</sup>) y el aporte hecho por los fertilizantes (kg ha<sup>-1</sup>) (Van Noordwijk, 1999).

#### **Análisis estadísticos**

Se realizaron análisis de varianza (ANDEVA) y test de medias (Tukey) para establecer la diferencia mínima significativa entre los distintos tratamientos, para las diferentes evaluaciones realizadas. Como software estadístico se usó Genstat 7.0 (Payne *et al.*, 2003).

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **Ensayo de trigo**

##### **Suelo**

El análisis de suelo tomado con posterioridad a la cosecha del cultivo (marzo del 2004), sólo arrojó diferencias significativas para las concentraciones edáficas de S y Mg, entre tratamientos (Cuadro 1). La concentración edáfica final promedio de S en los tratamientos fertilizados fue un 85% más alta que aquella al inicio del experimento (24 ± 2,8 y 13 ± 1,2 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente). El tratamiento SCA90 fue superior a los demás tratamientos (P ≤ 0,05) para el incremento en la concentración edáfica de S. Los tratamientos SMG presentaron un comportamiento intermedio, mientras que la concentración más baja se encontró en el tratamiento C (10 ± 1,5 mg kg<sup>-1</sup>). Esto se relacionó con la solubilidad de las fuentes empleadas. El SMG es más soluble al agua que el SCA, que se considera de baja solubilidad (Janzen y Bettany, 1986), por lo que el SCA, al ser menos soluble y, por tanto, mantener una acción más lenta y prolongada en el tiempo, arrojó valores finales más altos de S en el suelo, mientras que el SMG por ser soluble, fue probablemente perdido por inmovilización microbiana al momento de la aplicación o por lixiviación durante la primavera (precipitación promedio del área de estudio alcanza a 1800 mm año<sup>-1</sup>).

La concentración de Mg en el suelo fue inferior en el tratamiento C (P ≤ 0,05), debido a que no se aplicó este nutriente en dicho tratamiento. Los tratamientos fertilizados no difirieron entre sí (P > 0,05). En promedio, al final del período experimental, la concentración de Mg en los tratamientos fertilizados fue un 27% más alta que aquella del tratamiento C (1,86 ± 0,090 y 1,46 ± 0,300 cmol (+) kg<sup>-1</sup>, respectivamente).

Al analizar la eficiencia del fertilizante azufrado aplicado, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos (P > 0,05), alcanzando en promedio a 22 ± 3,5%, lo que coincide con resulta-

dos de Williams y Haynes (1992) para aplicación de S en suelos andisoles con praderas, en que se demostró que entre un 15-31% del S fertilizante aplicado se retiene en el suelo, pasando a incrementar el pool disponible de este elemento.

### Cultivo

El número de plantas por metro lineal fue similar para todos los tratamientos, variando entre  $41 \pm 2$  y  $45 \pm 2$  pl m<sup>-1</sup>, al igual que el número de macollos por planta ( $3 \pm 1$  macollos pl<sup>-1</sup>) ( $P > 0,05$ ).

El análisis de N y S foliar realizado en las hojas de trigo colectadas en diciembre del 2003 (hoja bandera) arrojó valores promedio de  $4,3 \pm 0,04$  y  $0,3 \pm 0,003\%$ , respectivamente, no difiriendo entre tratamientos, valores adecuados para este tipo de plantas (García, 2002). La concentración foliar de P fue mayor en el tratamiento SCA90, con  $0,33 \pm 0,004\%$ . Los demás tratamientos no variaron entre sí ( $0,31 \pm 0,005\%$ ;  $P > 0,05$ ). Mayores absorciones de P en presencia de S fueron descritas previamente por Mora *et al.* (2002).

Al momento de la cosecha no existieron diferencias significativas entre tratamientos para ninguno de los parámetros de productividad evaluados (Cuadro 3). Tampoco hubo diferencias significativas entre tratamientos para la concentración de nutrientes en el grano (Cuadro 3), y en la calidad del gluten, en coincidencia con resultados de García (2002). Estos parámetros de calidad alcanzaron en promedio a  $22,1 \pm 0,64\%$  y  $96,3 \pm 0,55\%$ , respectivamente (Cuadro 3). Los resultados indican que, como en el caso de cebada, el trigo no sería un cereal que responda de manera significativa a la aplicación de S (Janzen y Bettany, 1987).

Al analizar la cantidad total de nutrientes extraídos en el grano, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos ( $P > 0,05$ ). La extracción de N varió entre  $137 \pm 9,5$  y  $157 \pm 4,0$  kg N ha<sup>-1</sup>, la de P entre  $23 \pm 0,8$  y  $25 \pm 0,3$  kg P ha<sup>-1</sup>, y la de S entre  $12 \pm 0,3$  y  $13 \pm 0,6$  kg S ha<sup>-1</sup>, esto reafirma el rol que tiene la fertilidad natural o propia del sitio, enmascarando la acción de fertilizantes aplicados. Asimismo, el factor que más afectó la extracción de nutrientes desde el suelo fue el rendimiento total del cultivo y no la concentración de nutrientes en el grano, que no fue distinta entre tratamientos (Cuadro 3).

Los balances de puerta de N y P no fueron significativamente distintos entre los tratamientos ( $P > 0,05$ ), debido a que no hubo fertilización diferenciada de estos nutrientes. Los balances de N variaron entre  $+43 \pm 4,0$  y  $+63 \pm 9,5$  kg N ha<sup>-1</sup> y los de P entre  $+47 \pm 0,3$  y  $+50 \pm 0,8$  kg P ha<sup>-1</sup> (datos no mostrados). Los balances de S variaron entre tratamientos ( $P \leq 0,001$ ), siendo mayores en los tratamientos con aplicaciones de 90 kg S ha<sup>-1</sup>, independientemente de la fuente utilizada. El tratamiento control arrojó un balance negativo al final del período experimental. Los balances estimados fueron  $+78 \pm 0,3$ ;  $+77 \pm 0,5$ ;  $+33 \pm 0,5$ ;  $+33 \pm 0,8$  y  $-13 \pm 0,6$  kg S ha<sup>-1</sup> para los tratamientos SMG90, SCA90, SMG45, SCA45 y C, respectivamente. Estos resultados sugieren que a pesar de que en términos productivos el suelo es capaz de proveer los nutrientes necesarios para la obtención de un rendimiento adecuado y, que la calidad proteica del grano no mejora substancialmente con la aplicación de S en cobertera, la aplicación de fertilizante azufrado como fertilización de mantenimiento permite prever problemas de deficiencias en el suelo, debido a que la no aplicación de este nutriente resulta en balances negativos de este elemento, esto es, se produce una degradación de las reservas disponibles de este nutriente en el suelo, en acuerdo con la disminución de la concentración de S en el suelo al final del período experimental, en la estrata 0-20 cm (Cuadro 1). De acuerdo a los resultados de esta investigación, la fuente de S utilizada resultó ser menos importante que la dosis aplicada.

Es probable que en trigos de invierno sembrados temprano, los resultados que se obtengan sean diferentes, donde la incorporación temprana a la siembra de S permitiría un incremento en la utilización del nitrógeno aplicado, alterando factores del rendimiento, tales como número de macollos por planta. Sin embargo, estas aplicaciones debieran considerar potenciales pérdidas de S por lixiviación.

Los efectos en la calidad de gluten (o en la concentración de N y S en el grano) podrían verse más afectados en suelos con severas deficiencias de este nutriente o con menor contenido de materia orgánica (e.g., ultisoles), ya que en estos casos el suelo tendría una menor capacidad de reacción para el abastecimiento de S desde la fracción orgánica del mismo, debido a su menor contenido de materia orgánica (García, 2002).

**Cuadro 3.** Parámetros productivos y de calidad nutricional de un cultivo de trigo invernal (*Triticum aestivum* L.) cv. Otto, en un andisol de la Serie Piedras Negras, después de la aplicación de diferentes fuentes y dosis de fertilizante azufrado. n = 4, ± eem.  
**Table 3.** Yield productive parameters and nutritional quality of a winter wheat (*Triticum aestivum* L.) crop cv. Otto, in an andisol of the Piedras Negras soil series, after the application of different rates and sources of sulphur fertilizer. n = 4, ± sem

Trat.	Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	Índice de cosecha (IC)	Espigas m <sup>-2</sup> (N°)	Granos espiga <sup>-1</sup> (N°)	Peso 1000 granos (g)	Peso hectólitro (kg hL <sup>-1</sup> )	N (%)	P (%)	S (%)	Gluten (%)	Gluten index
C	8,9 ± 0,11	0,4 ± 0,02	515 ± 9,9	53 ± 1,2	45 ± 0,7	76 ± 0,2	2,0 ± 0,05	0,3 ± 0,00	0,2 ± 0,01	22,4 ± 0,82	95 ± 1,6
SCA45	8,9 ± 0,30	0,4 ± 0,03	501 ± 19,1	53 ± 2,2	45 ± 1,1	75 ± 0,3	2,0 ± 0,08	0,3 ± 0,01	0,2 ± 0,01	23,4 ± 1,39	97 ± 0,6
SCA90	8,4 ± 0,22	0,3 ± 0,03	514 ± 20,2	52 ± 1,8	45 ± 0,2	76 ± 0,4	2,0 ± 0,09	0,3 ± 0,01	0,2 ± 0,00	22,4 ± 2,17	96 ± 2,3
SMG45	8,2 ± 0,25	0,4 ± 0,004	513 ± 8,1	52 ± 1,1	45 ± 1,0	75 ± 0,3	1,9 ± 0,09	0,3 ± 0,00	0,2 ± 0,00	20,8 ± 1,57	97 ± 0,4
SMG90	8,4 ± 0,06	0,4 ± 0,02	481 ± 7,0	52 ± 2,7	44 ± 0,5	75 ± 0,2	2,0 ± 0,09	0,3 ± 0,01	0,2 ± 0,00	21,2 ± 1,26	96 ± 0,6

Parámetros no estadísticamente distintos (P > 0,05).

C: sin aplicación de S; SCA45: 45 kg S ha<sup>-1</sup>, sulfato de calcio; SCA90: 90 kg S ha<sup>-1</sup>, sulfato de calcio; SMG45: 45 kg S ha<sup>-1</sup>, sulfato de magnesio; SMG90: 90 kg S ha<sup>-1</sup>, sulfato de magnesio.  
 eem: error estándar de la media.

Los resultados obtenidos sugieren la necesidad de realizar estudios con  $^{35}\text{S}$  marcado, con el fin de establecer si el S extraído por el cultivo corresponde a S proveniente del fertilizante aplicado o S mineralizado desde la fracción orgánica de este elemento en el suelo, como parece ser el caso de este estudio.

## Ensayo en pradera

### Suelo

El análisis final de suelo indica que los parámetros relacionados con la acidez de suelo se vieron incrementados en el tiempo por la no aplicación de carbonato de calcio durante el otoño previo al inicio del ensayo, práctica recomendada en praderas del sur de Chile (Mora *et al.*, 2004). La concentración inicial de S fue superada en un 656% por aquella final obtenida en los tratamientos con aplicación del elemento ( $2 \pm 0,06$  y  $31 \pm 1,4$  mg kg $^{-1}$  para el muestreo inicial y final promedio de los tratamientos fertilizados con S, respectivamente).

Al final del experimento, el análisis de suelo arrojó diferencias significativas para la concentración de Mg y S (Cuadro 2). La concentración más alta de Mg se obtuvo en el tratamiento SMG, debido a la aplicación directa de este elemento y a su mayor solubilidad, en comparación a los demás tratamientos, como se discutió anteriormente. La concentración de S no fue distinta entre tratamientos con aplicación del elemento, pero fue mayor en éstos que en el tratamiento control (Cuadro 2). En promedio, estos tratamientos presentaron una concentración de S un 138% más alta que la del testigo ( $13 \pm$

$4,9$  y  $31 \pm 1,4$  mg kg $^{-1}$  para el tratamiento control y los tratamientos con S, respectivamente).

Al analizar la eficiencia del fertilizante azufrado aplicado, no hubo diferencias significativas entre tratamientos ( $P > 0,05$ ), alcanzando en promedio a  $23 \pm 3,1\%$ . Este valor se enmarca dentro de los resultados obtenidos para sistemas prateros de Nueva Zelanda (Williams y Haynes, 1992). En aplicaciones en cobertera sobre praderas de similares condiciones a las empleadas en este estudio, cualquiera de las fuentes empleadas tuvo el mismo impacto en elevar la concentración edáfica de S.

### Rendimiento y calidad de la pradera

El rendimiento de la pradera difirió entre tratamientos para el primer y segundo corte (primavera 2003; Cuadro 4), probablemente como respuesta directa a la aplicación de fertilizante. Hacia el segundo corte podría estar relacionado con la mayor disponibilidad de S, K y Mg en las parcelas fertilizadas con SKMG y a la mayor solubilidad de esta fuente, en relación a los otros tratamientos, no existiendo diferencias significativas entre las otras fuentes probadas (Cuadro 4). Este efecto inmediato ha sido descrito anteriormente en praderas (Williams y Haynes, 1993), estando dado por la dependencia N/S en la absorción y, por ende, potenciación del crecimiento. El efecto de la fertilización azufrada sobre el rendimiento se acentúa cuando se incrementa la aplicación de N. Estas diferencias en rendimiento se diluyeron con el paso del tiempo, de manera que el rendimiento acumulado por tratamiento no fue estadísticamente diferente (Cuadro 4).

**Cuadro 4. Rendimiento por corte y acumulado (kg MS ha $^{-1}$ ) de una pradera naturalizada luego de la aplicación de 90 kg S ha $^{-1}$  en cobertera con distintas fuentes de fertilizante azufrado, en un andisol de la Serie Osorno. Período 15/09/03-15/05/04. n = 4,  $\pm$  eem.**

**Table 4. Yield per cut and total yield (kg DM ha $^{-1}$ ) of a naturalized pasture after spreading 90 kg S ha $^{-1}$  with different sources of sulphur fertilizer, in an andisol of the Osorno soil series. Period 15/09 /2003-15/05/2004. n = 4,  $\pm$ sem.**

Tratamiento	Rendimiento por corte					Rend. acum. (kg MS ha $^{-1}$ )
	(kg MS ha $^{-1}$ )					
	Corte 1 (21/10/2003)	Corte 2 (06/11/2003)	Corte 3 (11/12/2003)	Corte 4 (22/01/2004)	Corte 5 (14/05/2004)	
C	1649 $\pm$ 162,1 a	542 $\pm$ 53,4 b	2128 $\pm$ 146,8 a	598 $\pm$ 55,9 a	1387 $\pm$ 66,6 a	4916 $\pm$ 229 a
SMG	1063 $\pm$ 69,9 b	510 $\pm$ 80,7 b	2182 $\pm$ 138,0 a	590 $\pm$ 68,0 a	1313 $\pm$ 39,9 a	4344 $\pm$ 184 a
SCA	1031 $\pm$ 36,5 b	637 $\pm$ 51,6 b	2086 $\pm$ 215,4 a	634 $\pm$ 117,3 a	1325 $\pm$ 118,8 a	4389 $\pm$ 333 a
SKMG	1377 $\pm$ 116,4 a	887 $\pm$ 34,4 a	2051 $\pm$ 138,5 a	692 $\pm$ 187,7 a	1417 $\pm$ 159,7 a	5007 $\pm$ 298 a

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas entre tratamientos ( $P \leq 0,05$ ).

C: sin aplicación de S; SMG: 90 kg S ha $^{-1}$ , sulfato de magnesio; SCA: 90 kg S ha $^{-1}$ , sulfato de calcio; SKMG: 90 kg S ha $^{-1}$ , sulfato doble de potasio y magnesio.

eem: error estándar de la media.

La diferencia en rendimiento en los primeros cortes fue acompañada por diferencias en la calidad nutricional de la pradera durante la primavera (Cuadro 5). En ambos cortes hubo diferencias significativas entre tratamientos para la concentración foliar de S y en la digestibilidad de la pradera. En el primer corte (25 d postaplicación), se encontró una mayor concentración foliar de S en el tratamiento SMG, la menor concentración se midió en el tratamiento C (Cuadro 5), nuevamente asociado a la solubilidad de la fuente de S. En el segundo corte (41 d postaplicación), la mayor concentración foliar de S se observó en los tratamientos SCA y SKMG, lo que sólo resultó en una mayor calidad de digestibilidad del forraje en el tratamiento SKMG (Cuadro 5),

decaendo la calidad del tratamiento SMG. A partir de esta fecha no hubo diferencias en la calidad nutricional del forraje cosechado (Cuadro 5).

De la misma manera que los efectos en rendimientos se observan en cortos períodos de tiempo después de la aplicación, los cambios en la concentración foliar de S se producen de manera casi inmediata (Janzen y Bettany, 1986). La relación N/S se considera un buen indicador de la calidad nutricional del forraje para consumo animal (Mora *et al.*, 2002), donde valores inferiores a 17 se consideran adecuados para alimentación de animales. Resultados del presente estudio arrojaron relaciones N/S que variaron entre 8 y 11 (derivado del Cuadro 5).

**Cuadro 5. Calidad nutricional y concentraciones foliares de N, P y S (%) por corte, de una pradera naturalizada luego de la aplicación de 90 kg S ha<sup>-1</sup> en cobertera con distintas fuentes de fertilizante azufrado, en un andisol de la Serie Osorno. Período 15/09/03-15/05/04. n = 4, ± eem.**

**Table 5. Nutritional quality and foliar N, P and S concentrations in shoots (%) per cut, of a naturalized pasture after spreading 90 kg S ha<sup>-1</sup> with different sources of sulphur fertilizer, in an andisol of the Osorno soil series. Period 15/09/2003-15/05/2004. n = 4, ± sem.**

Corte	Parámetro	Tratamiento			
		C	SMG	SCA	SKMG
Corte 1 (21/10/2003)	N, %***	3,4 ± 0,10 a	3,2 ± 0,05 b	3,2 ± 0,06 c	3,4 ± 0,06 a
	P, %**	0,43 ± 0,010 a	0,40 ± 0,010 b	0,37 ± 0,010 c	0,41 ± 0,010 a
	S, %***	0,3 ± 0,01 d	0,5 ± 0,02 a	0,35 ± 0,010 c	0,4 ± 0,01 b
	D, %**	79 ± 0,8 a	79 ± 0,7 a	78 ± 1,0 b	79 ± 0,7 a
	EM, Mcal kg <sup>-1</sup>	2,8 ± 0,01 a	2,8 ± 0,01 a	2,8 ± 0,02 a	2,8 ± 0,01 a
Corte 2 (06/11/2003)	N, %	3,3 ± 0,07 a	3,3 ± 0,05 a	3,2 ± 0,06 a	3,3 ± 0,11 a
	P, %	0,4 ± 0,01 a	0,4 ± 0,02 a	0,4 ± 0,01 a	0,4 ± 0,01 a
	S, %***	0,34 ± 0,021 b	0,30 ± 0,010 c	0,40 ± 0,030 a	0,40 ± 0,020 a
	D, %***	73 ± 0,7 b	72 ± 0,7 c	72 ± 0,6 c	74 ± 0,6 a
	EM, Mcal kg <sup>-1***</sup>	2,7 ± 0,01 a	2,6 ± 0,1 b	2,6 ± 0,1 b	2,7 ± 0,02 a
Corte 3 (11/12/2003)	N, %	2,6 ± 0,13 a	2,5 ± 0,04 a	2,4 ± 0,07 a	2,7 ± 0,13 a
	P, %	0,3 ± 0,01 a			
	S, %	0,3 ± 0,03 a	0,4 ± 0,03 a	0,4 ± 0,01 a	0,4 ± 0,13 a
	D, %	80 ± 0,7 a	79 ± 0,7 a	75 ± 4,9 a	79 ± 0,3 a
	EM, Mcal kg <sup>-1</sup>	2,9 ± 0,02 a	2,9 ± 0,02 a	2,7 ± 0,16 a	2,9 ± 0,01 a
Corte 4 (22/01/2004)	N, %	2,3 ± 0,06 a	2,6 ± 0,16 a	2,2 ± 0,08 a	2,3 ± 0,16 a
	P, %	0,2 ± 0,01 a	0,2 ± 0,01 a	0,2 ± 0,00 a	0,2 ± 0,01 a
	S, %	0,3 ± 0,02 a	0,3 ± 0,03 a	0,3 ± 0,04 a	0,4 ± 0,04 a
	D, %	68 ± 0,4 a	66 ± 2,0 a	66 ± 1,4 a	67 ± 0,7 a
	EM, Mcal kg <sup>-1</sup>	2,5 ± 0,01 a	2,4 ± 0,06 a	2,4 ± 0,05 a	2,4 ± 0,02 a
Corte 5 (14/05/2004)	N, %	2,3 ± 0,15 a	2,3 ± 0,11 a	2,2 ± 0,07 a	2,2 ± 0,04 a
	P, %	0,2 ± 0,02 a	0,2 ± 0,01 a	0,2 ± 0,01 a	0,2 ± 0,01 a
	S, %	0,2 ± 0,01 a	0,2 ± 0,03 a	0,2 ± 0,02 a	0,2 ± 0,02 a
	D, %	64 ± 3,6 a	61 ± 4,2 a	61 ± 2,7 a	57 ± 3,4 b
	EM, Mcal kg <sup>-1</sup>	2,4 ± 0,12 a	2,3 ± 0,14 a	2,3 ± 0,09 a	2,1 ± 0,11 b

Letras diferentes en filas indican diferencias significativas entre tratamientos (\*\*P ≤ 0,01 y \*\*\*P ≤ 0,001).

C: sin aplicación de S; SMG: 90 kg S ha<sup>-1</sup>, sulfato de magnesio; SCA: 90 kg S ha<sup>-1</sup>, sulfato de calcio; SKMG: 90 kg S ha<sup>-1</sup>, sulfato doble de potasio y magnesio.

eem: error estándar de la media.

Esta relación es característica de plantas con suficiente disponibilidad de S, pero a las que les faltó N (Janzen y Bettany, 1986), situación que concuerda con los balances negativos de N obtenidos en este ensayo (ver más adelante). A este nivel de relaciones N/S en la planta, se habla de efecto de S en la calidad del alimento, pero no en la cantidad de alimento generado, como es el caso de este estudio. Es probable que en praderas sembradas con especies forrajeras nobles, la respuesta a la aplicación de S sea mayor, en relación a praderas naturalizadas con predominancia de especies de menor calidad y potencial de crecimiento, pero requiera de aplicaciones más altas de N, por ejemplo, en el otoño siguiente a la aplicación primaveral de S.

Los resultados de calidad nutricional de la pradera coinciden con la observación de una mayor presencia de leguminosas en las parcelas tratadas con S, fenómeno que ha sido descrito antes para sectores fertilizados con este elemento, debido a que las leguminosas son deficientes en la competencia por la utilización de este nutriente (Williams y Haynes, 1990), por lo que adecuados niveles de S en el suelo son necesarios para establecer y mantener una adecuada población de trébol en el tiempo (Mora *et al.*, 2002). Es necesario realizar estudios tendientes a verificar el impacto de la fertilización azufrada en la producción y calidad de praderas sembradas, así como a establecer el rol del aporte del suelo y la lixiviación en el suministro total de S. Un mayor conocimiento de estos aspectos permitirá realizar estudios con animales en producción, para determinar si las diferencias en calidad de la pradera registradas son suficientes para generar incrementos en producción secundaria.

Los balances de puerta de N para la pradera no fueron significativamente distintos entre los tratamientos ( $P > 0,05$ ), variando entre  $-54 \pm 2,0$  y  $-63 \pm 3,3$  kg N  $ha^{-1}$ , sugiriendo la necesidad de aplicaciones más altas de este nutriente en praderas manejadas bajo corte, por ejemplo, durante el otoño siguiente. Esto podría haber limitado incrementos en la producción de forraje por adición de S en el presente ensayo, como se discutió previamente.

Los balances de puerta de P fueron  $+19 \pm 0,3$ ;  $+24 \pm 0,8$ ;  $+22 \pm 0,6$  y  $+22 \pm 0,6$  kg S  $ha^{-1}$  para los tratamientos SKMG, SCA, SMG y C, respectivamente ( $P \leq 0,001$ ), lo que se podría relacionar con una mayor extracción (eficiencia de absorción) de P en presencia de S, en concordancia con Mora *et al.*

(2002). La baja concentración inicial de P en el suelo, pudo haber enmascarado un mayor efecto del S en la productividad de la pradera. El balance de puerta de P fue más alto en el tratamiento SCA, sugiriendo una menor extracción de P por una mayor presencia de Ca en la solución del suelo, lo que pudo provocar problemas de inmovilidad del P, en coincidencia con Shainberg *et al.* (1989).

Los balances de puerta de S fueron mayores en los tratamientos con incorporación del elemento que en el tratamiento control, donde fue negativo, pero no hubo un efecto de la fuente de S utilizada ( $+65 \pm 0,8$ ;  $+67 \pm 0,9$ ;  $+66 \pm 1,0$  y  $-18 \pm 0,9$  kg S  $ha^{-1}$ , para los tratamientos SKMG, SCA, SMG y C, respectivamente;  $P \leq 0,001$ ). Esto sugiere la necesidad de realizar aplicaciones de S en este tipo de suelos con el fin de evitar la degradación de este recurso en el tiempo, aun cuando su incorporación no se traduzca en diferencias productivas.

Los balances de puerta de S estuvieron relacionados a la extracción de S hecha por la pradera, que también fue mayor en aquellos tratamientos que recibieron fertilización azufrada en relación al tratamiento control, pero donde tampoco hubo diferencias significativas entre distintas fuentes de S (datos no mostrados). Los valores obtenidos en los tratamientos fertilizados (en promedio 24 kg S  $ha^{-1}$ ) concuerdan con resultados obtenidos en el extranjero (23 kg S  $ha^{-1}$ , Mengel y Kirkby, 1987).

Al analizar la eficiencia aparente de utilización de S por la pradera, no se observaron diferencias significativas entre distintas fuentes de S ( $P > 0,05$ ), en promedio ésta alcanzó a  $6 \pm 0,6\%$  del fertilizante aplicado. Esto se debió básicamente a que el suelo fue capaz de proveer  $18 \pm 0,8$  kg S  $ha^{-1}$  durante el período experimental (extracción del tratamiento control). También, la baja recuperación de S pudo haber estado relacionada con la inmovilización del S-sulfato aplicado en la fracción orgánica del suelo (Watkinson y Kear, 1996) y la lixiviación de este elemento (Nguyen y Goh, 1992), debido a la primavera húmeda del año 2003. Williams y Haynes (1993) encontraron que hasta un 25% del S-sulfato existente en un suelo puede perderse por lixiviación en primavera.

La extracción total de N en el período no varió entre tratamientos, alcanzando en promedio a  $180 \pm 1,7$  kg N  $ha^{-1}$  ( $P > 0,05$ , datos no mostrados), por lo que la adición de S en cobertera no incrementó la eficiencia

de absorción o utilización de este elemento. Esto contrasta con resultados de Brown *et al.* (2000), quienes encontraron en Inglaterra que en suelos permeables, la aplicación de S incrementa la eficiencia de utilización de N, dependiendo el efecto total de la fertilización nitrogenada aplicada. Esto pudo deberse a la baja dosis de N aplicado en el presente ensayo ( $120 \text{ kg N ha}^{-1}$ , totales) en comparación con aquellas probadas por Brown *et al.* (2000) ( $200$  y  $450 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) y a la no parcialización del S aplicado, que en el estudio inglés se hizo coincidir con las fertilizaciones nitrogenadas, en dosis de  $15 \text{ kg S ha}^{-1}$ . Esto sugiere que es más eficiente aplicar bajas dosis de S parcializadas en el tiempo, asociadas a la fertilización nitrogenada. También es probable que la mineralización de S observada no haya ocurrido a la par con aquella de N (Haque y Walmsley, 1972).

Los resultados obtenidos en trigo y pradera naturalizada sugieren que la fuente de S utilizada es importante sólo en los primeros estados de crecimiento. En general, la falta de respuesta a la aplicación de S en trigo podría estar relacionada con la fertilidad natural del suelo, con la inmovilización del S aplicado en la fracción orgánica del suelo y su lixiviación de S-sulfato a estratas subsuperficiales del suelo, no consideradas en el análisis de fertilidad realizado. Este sulfato disponible podría haber sido utilizado por las raíces de las plantas de trigo, que se desarrollaron en respuesta a la alta aplicación de N utilizada ( $200 \text{ kg N ha}^{-1}$ ; García, 2002). En suelos sometidos a rotación de cultivo, con movimiento de suelo, se espera que ocurra un aporte de S-sulfato desde la materia orgánica fresca, no estabilizada, lo que concuerda con los resultados de extracción de S obtenidos en el tratamiento control. A ello, se debe sumar la mayor mineralización ocurrida durante la estación de crecimiento del cultivo en evaluación. En praderas, la acumulación de residuos orgánicos frescos se produce de manera natural (Haynes y Williams, 1993), los que son degradados constituyendo una fuente de S-sulfato disponible para las plantas, en concordancia con los resultados obtenidos en este estudio.

Estos resultados sugieren que en áreas con severa deficiencia de S, ésta puede corregirse mediante la aplicación de dosis de S de entre  $25$  y  $35 \text{ kg ha}^{-1}$ , existiendo un efecto diferenciado en el resultado final de acuerdo a la solubilidad de la fuente empleada. Sin embargo, al momento de elegir el fertilizante azufrado será más relevante considerar el costo de la unidad de S.

## CONCLUSIONES

En el suelo andisol empleado en este trabajo, la aplicación de S no se tradujo en incrementos de rendimiento o calidad proteica y del gluten del grano, independientemente de la fuente y dosis de S utilizadas. La utilización de S en cobertera en cultivos invernales de trigo corrigió la deficiencia de este elemento en el suelo (0-20 cm).

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, para fines correctivos de deficiencias de S en el suelo, dosis mayores a  $45 \text{ kg S ha}^{-1}$ , en una sola aplicación, no incrementaron significativamente la corrección de la deficiencia.

En trigo, la baja respuesta a la aplicación de S pudo estar relacionada con la fertilidad natural del suelo y el movimiento de éste, lo que facilitó la mineralización de S orgánico del mismo, favoreciendo su suministro.

En el suelo andisol empleado en este trabajo, la aplicación de S en cobertera se tradujo en incrementos de la concentración foliar de S, pero no resultó en cambios significativos de la calidad del forraje. El efecto obtenido dependió de la solubilidad de la fuente de S utilizada, siendo mayor para el caso de SKMG y SMG y menor para SCA, durante el primer mes de producción post aplicación. No se observó un incremento del rendimiento de la pradera por adición de S, independientemente de la fuente utilizada. El decremento de la relación N/S en la planta a través del tiempo sugiere que un aporte de N en el otoño siguiente a la aplicación de S podría haber permitido la expresión de diferencias productivas entre tratamientos.

Se requieren estudios adicionales para establecer el rol de la fracción orgánica del S del suelo y la lixiviación de S en el suministro de S para cultivos y praderas, como también para cuantificar la respuesta productiva y cualitativa de praderas sembradas. La utilización de S en cobertera en praderas naturalizadas, fue una buena alternativa para incrementar la disponibilidad de este elemento en el suelo (0-10 cm,  $23 \pm 3,1\%$  de eficiencia del fertilizante aplicado, en promedio).

## RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por Cargill Chile. Los autores agradecen al Sr. Gustavo Meneses (INIA Remehue) por su colaboración en el trabajo de campo y al Sr. Mario Moll (agricultor) por facilitar el desarrollo de esta investigación.

## LITERATURA CITADA

- Aguilera, S.M., M. Mora, G. Borie, P. Peirano, and H. Zunino. 2002. Balance and distribution of sulphur in volcanic ash-derived soils in Chile. *Soil Biol. Biochem* 34:1355-1362.
- Alfaro, M. 1999. Fertilización azufrada en praderas de la X Región. *Tierra Adentro* Nº 26 p. 38-40.
- AOAC. 1970. Official methods. 1015 p. Association of Official Agricultural Chemist. William Horwitz, Washington DC, USA.
- Baeza, G. 2001. Dinámica del reciclaje de N, P y S proveniente de excretas animales en un andisol acidificado. 103 p. Tesis Dr. Química. Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Química y Biología, Santiago, Chile.
- Brown, L., D. Scholefield, E.C. Jewkes, N. Preedy, K. Wadge, and M.R. Butler. 2000. The effect of sulphur application on the efficiency of nitrogen use in two contrasting grassland soils. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 135:131-138.
- CIREN. 2003. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Estudio agrológico X Región, Tomo II. Publicación Nº 123. 412 p. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Santiago, Chile.
- Chaudhry, I.A., and A. Cornfield. 1971. Low-temperature storage for preventing changes in mineralizable nitrogen and sulphur during storage of air-dry soils. *Geoderma* 5:165-168
- García, A. 2002. Respuesta a la fertilización con azufre en trigo pan. Disponible en [http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/le/pol/2002/s\\_trigo.pdf](http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/le/pol/2002/s_trigo.pdf). Leído el 12 de mayo de 2005.
- Haque, I., and D. Walmsley. 1972. Incubation studies on mineralization of organic sulphur and organic nitrogen. *Plant Soil* 37:255-264.
- Haynes, R.J., and P.H. Williams. 1993. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. *Adv. Agron.* 49:119-199.
- Janzen, H.H., and J.R. Bettany. 1986. Release of available sulphur from fertilizers. *Can. J. Soil Sci.* 66:91-103.
- Janzen, H.H., and J.R. Bettany. 1987. Oxidation of elemental sulphur under field conditions in central Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 67:609-618.
- Mengel, K., and E. Kirkby. 1987. Sulphur. p. 385-402. *In* International Potash Institute (ed.). Principles of plant nutrition. Bern, Switzerland.
- Mora, M., P. Cartes, R. Demanet, and I.S. Cornforth. 2002. Effects of lime and gypsum on pasture growth and composition on an acid andisol in Chile, South America. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33:2069-2081.
- Mora, M., M. Alfaro, P.H. Williams, W. Stehr, and R. Demanet. 2004. Effect of fertilizer input on soil acidification in relation to growth and chemical composition of a pasture and animal production. *Rev. Cienc. Suelo Nutr. Veg.* 4:29-40.
- Nguyen, M.L., and K.M. Goh. 1992. Nutrient cycling and losses based on a mass-balance model in grazed pastures receiving long-term superphosphate applications in New Zealand. 2. Sulphur. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 119:107-122.
- Payne, R., D. Murray, S. Harding, D. Baird, D. Soutar, and P. Lane. 2003. *GenStat® 7.1 for Windows™*. 7<sup>th</sup> ed. 336 p. Lawes Agricultural Trust, Rothamsted, UK.
- Sadzawka, A. 1990. Métodos de análisis de suelos. Serie La Platina Nº 16. 20 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.
- Sadzawka, A., R. Grez, M. Carrasco, y M. Mora. 2004. Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. 50 p. Comisión de Normalización y Acreditación. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo (SCCS), Santiago, Chile.
- Shainberg, I., M.E. Sumner, W.P. Miller, M.P.W. Farina, M.A. Pavan, and M.V. Fey. 1989. Use of gypsum on soils: a review. *Adv. Soil Sci.* 9:1-111.
- Tilley, J.M., and R.A. Terry. 1963. A two stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *J. Br. Grassl. Soc.* 18:104-111.
- Van Noordwijk, M. 1999. Nutrient cycling in ecosystems versus nutrient budgets of agricultural systems. p. 1-26. *In* Smaling, E.M.A., O. Oenema, and L.O. Fresco (eds.). Nutrient disequilibria in agroecosystems, concepts and case studies. CAB International, Cambridge, UK.
- Watkinson, J.H., and M.J. Kear. 1996. Sulfate and mineralisable organic sulphur in pastoral soils of New Zealand. I. A quasi equilibrium between sulphate and mineralisable organic sulphur. *Aust. J. Soil Res.* 34:385-403.
- Williams, P., and R.J. Haynes. 1990. Cycling of P and S through the soil-plant-animal system under intensively grazed grass-clover pastures. Volume 4. p. 276-281. *In* Transactions of the 14<sup>th</sup> International Congress of Soil Science, August 1990. International Society of Soil Science, Kyoto, Japan.
- Williams, P., and R.J. Haynes. 1992. Balance sheet of phosphorus, sulphur and potassium in a long-term grazed pasture supplied with superphosphate. *Fert. Res.* 31:51-60.
- Williams, P., and R.J. Haynes. 1993. Fate of <sup>35</sup>S-labelled urine sulphate in urine affected areas of pasture soil under field conditions. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 121:83-89.
- Zia, M.S., M. Islam, M. Arshad, and T. Ahmed. 1999. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers with and without gypsum. *Soil Use Manage.* 15:133-135.