

## **El Azufre en Cereales de Invierno: Resumen de Resultados Experimentales y Repaso de la Teoría**

Adriana García Lamothe<sup>1</sup>, Andrés Quincke<sup>1</sup>

Es cada vez más frecuente encontrar deficiencia de azufre (S) en nuestros sistemas agrícolas, y la información disponible avala que el tema se ha ido imponiendo gradual y sostenidamente. Por ejemplo, ya en 1994 un monitoreo del estatus nutricional de chacras en el sur del país dejó en evidencia que un tercio de los cultivos de maíz presentaba concentraciones de S en planta inferiores al nivel crítico de 0.12 %. Además los síntomas de deficiencia de S son característicos y se están registrando incrementos en rendimiento y/o calidad cuando se agrega S vía fertilizante. El presente trabajo tiene como objetivo resumir los resultados experimentales sobre fertilización con S realizados en INIA y discutirlos a la luz del conocimiento teórico existente.

### **El rol del S y su asimilación por la planta**

El azufre (S) es constituyente y estabilizador de proteínas y por lo tanto tiene funciones estructurales. Además interviene en el metabolismo vegetal formando parte de amino ácidos, coenzimas, hormonas, o constituye compuestos antioxidantes que permite a la planta recuperarse de estreses bióticos y abióticos. La mayor parte del S lo absorbe la planta en forma de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) el cual llega a las raíces por flujo de masa y/o difusión. El  $\text{SO}_4^{2-}$  es reducido en las hojas, sintetizándose primero cisteína, molécula donadora de S para la mayoría de los compuestos orgánicos. El  $\text{SO}_4^{2-}$  absorbido pero no reducido se almacena en las vacuolas, pero su removilización hacia otras partes de la planta es lenta. Precisamente, debido a la escasa movilidad del  $\text{SO}_4^{2-}$  dentro de la planta, las deficiencias de S se manifiestan primeramente en el color verde pálido o amarillento de las hojas más jóvenes, a diferencia de lo que ocurre con la deficiencia de N que aparece primero en las hojas más viejas.

### **¿Por qué en el pasado no se manifestaban deficiencias de S en nuestros sistemas agrícolas?**

Resulta oportuno repasar qué cambios ocurrieron en los flujos de entradas y salidas de S en nuestros sistemas de producción. Respecto a las entradas, en los sistemas agrícola-ganaderos típicos de la década del '80 el fertilizante más usado para aplicar fósforo era el superfosfato simple, el cual contiene 13 – 14 kg de S por cada 100 kg de fertilizante. Paulatinamente esa fuente de P fue sustituida por otras más concentradas o fertilizantes binarios (N-P) con poco o nada de S, eliminándose prácticamente la entrada de S vía fertilizante. En regiones industriales se menciona también que la concentración de  $\text{SO}_2$  atmosférico ha ido disminuyendo como resultado de las nuevas tecnologías de "producción limpia" aplicadas en la industria, con lo cual se supone que también disminuyó la entrada "natural" por deposición atmosférica. Respecto a las salidas, ha ocurrido un notable incremento de la extracción de S por parte de los cultivos como resultado de varios procesos interrelacionados, asociados a la intensificación de nuestros sistemas agrícolas. No solamente ha aumentado progresivamente el potencial de rendimiento de los cultivos, sino que también ha ocurrido un aumento en el número promedio de cultivos que se producen por hectárea y por año. También ha aumentado la concentración de S en el grano cosechado, asociado a la dominancia de cultivos de alto S como es el cultivo de soja.

### **Resultados de respuesta a S en cultivos de invierno**

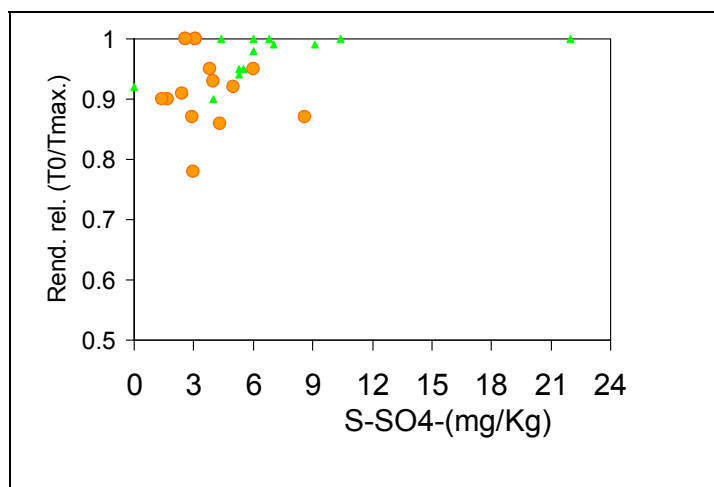
En el área de influencia de INIA La Estanzuela se realizaron varios estudios de respuesta al agregado de S en trigo y/o cebada. Primeramente, entre 1998 y 2001 se condujeron una serie de experimentos en trigo en suelos de textura franca y niveles medios de C orgánico (1.9-2.2%), representativos del litoral oeste. Si bien hubo un efecto positivo del S en producción de biomasa en

<sup>1</sup> Suelos, INIA La Estanzuela.

estadios vegetativos (en 65 % de los casos), sólo ocurrió respuesta en rendimiento en el 20 % de los casos. Dicho incremento en rendimiento osciló entre 4 y 14 %.

Estos resultados sugieren que la deficiencia de S tiende a atenuarse a medida que avanza el ciclo del cultivo y puede atribuirse a que en la primavera mejoran las condiciones ambientales para la liberación de  $\text{SO}_4^{2-}$  (por mineralización de la MOS). Además, también se sabe que aumenta la exploración radical del cultivo que le permite acceder al  $\text{SO}_4^{2-}$  de las capas más profundas.

En los años 2008 y 2009 se obtuvo respuesta en grano en 4 sitios de un total de 13 experimentos, en suelos con niveles de  $\text{SO}_4^{2-}$  (a 0-15 cm) entre 1 y 9 mg/kg (o ppm). En la figura 1 se representa gráficamente las respuestas en grano de 9 experimentos de trigo y 4 de cebada de los experimentos parcelarios realizados en el litoral agrícola. En general, cuando el nivel de  $\text{SO}_4^{2-}$  es inferior a 6 mg/kg es frecuente encontrar respuesta positiva al S. No obstante esta respuesta es muy variable dependiendo de condiciones edafoclimáticas o específicas del cultivo. En los casos con niveles entre 6 y 10 mg/kg de  $\text{SO}_4^{2-}$  sólo se encontró respuesta en uno de 5 sitios. Por último, por encima de 10 mg/kg no hubo respuesta a S; aunque tampoco es frecuente encontrar valores tan altos.



**Figura 1.** Relación entre la concentración de sulfato (0-15 cm) y el rendimiento relativo expresado como el rendimiento del testigo sin S sobre el máximo rendimiento con S. (Los triángulos representan datos de los experimentos entre el 1998 y 2001 en tanto los círculos los de los experimentos más recientes).

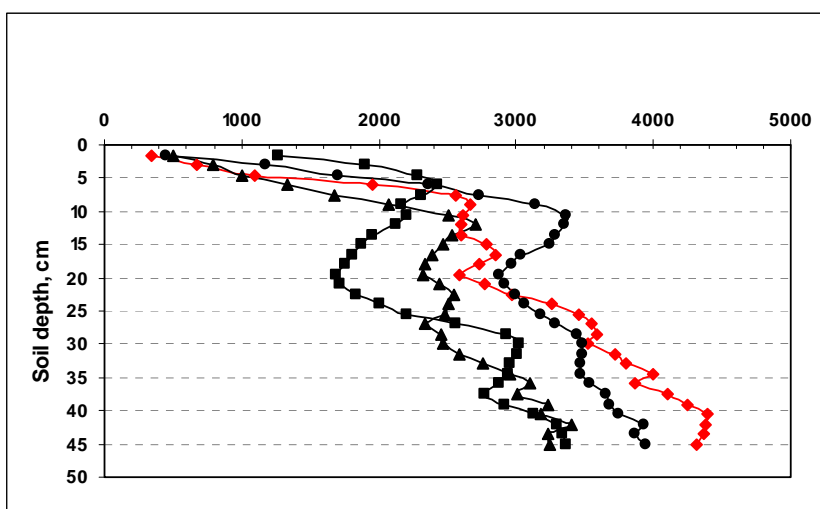
Es importante destacar que en toda la serie de experimentos mencionados ha habido casos de respuesta negativa con dosis de S mayores a 40 kg de S/ha. La dosis de S requerida para obtener el máximo físico ha fluctuado entre 13 y 40 kg/ha pero con los valores más frecuentes en el rango de 20 a 30 kg de S/ha para cultivos con rendimiento por encima de la media nacional.

### Resultados de un monitoreo de chacras de trigo

En 2009 se realizó un monitoreo de 24 chacras de trigo en Soriano, cuyos resultados avalan parcialmente la información de los estudios parcelarios. El rendimiento promedio de las chacras fue 3300 kg/ha, y en las muestras de grano se determinó la concentración de S y la relación N:S. Estos dos parámetros han sido propuestos como indicadores de deficiencia de S. De acuerdo a información reciente generada en Argentina, se consideraría que hubo deficiencia de S cuando el S en grano es menor a 0.15% y la relación N:S es mayor a 13.3. En las 24 chacras de trigo del 2009 el S en grano osciló entre 0.13 y 0.16% y la relación N:S entre 11.4 y 13.9. Con base en estos criterios se concluyó que el S fue limitante sólo en 4 de las 24 chacras. Sin embargo cabe aclarar que según la información relevada, en general se usaron dosis de N moderadas que pueden haber resultado "subóptimas". Por lo tanto, es probable que con rendimientos potenciales más altos (no limitados por el N), una mayor proporción de chacras hubiese resultado deficiente en S.

## Las condiciones físicas del suelo y la absorción de azufre

Debido a que ocurren procesos de acumulación de  $\text{SO}_4^{-2}$  intercambiable en horizontes subsuperficiales, es importante que las plantas puedan desarrollar plenamente el crecimiento de raíces en profundidad. Una condición sub-óptima del suelo para el crecimiento radical, como puede ser la compactación, la acidez o la acumulación de sustancias tóxicas, puede impedir el aprovechamiento del  $\text{SO}_4^{-2}$  de distintos estratos del suelo. Un ejemplo extremo se pudo observar en 2008 en una chacra de trigo cerca de Dolores, en la cual se determinó la resistencia a la penetración (figura 2). Se puede apreciar que tan sólo a 10 cm de profundidad la resistencia a la penetración era superior al nivel crítico de 2 MP citado por la literatura. Eso significa que el suelo impuso restricciones al crecimiento de raíces en profundidad. En este sitio de Dolores el agregado de S incrementó el rendimiento. En cambio no hubo respuesta al agregado de S en otros suelos con niveles bajos de  $\text{SO}_4^{-2}$  en los 0-15 cm (igual que el suelo de Dolores) pero que no tenían restricciones para el crecimiento de raíces. Estas observaciones sugieren nuevamente la importancia del aporte de S de estratos u horizontes subsuperficiales del perfil.



**Figura 2.** Resistencia a la penetración de un suelo de una chacra de trigo cerca de Dolores. Las distintas curvas corresponden a los distintos momentos de muestreo y la variabilidad se debe a diferente humedad del suelo al momento de la medición.

## Elementos para planificar el manejo de la fertilización con S

Se reconocen fundamentalmente dos filosofías para manejar la fertilización: una es la de “suficiencia” y la otra la de “reconstrucción y mantenimiento”. La primera implica tener información de niveles críticos y calibraciones que permitan recomendar una dosis económicamente eficiente. Esta es la filosofía o estrategia más usada en el manejo del nitrógeno, debido a que es un nutriente típicamente móvil y se pierde fácilmente por diversas vías. Aunque el  $\text{SO}_4^{-2}$  sería menos susceptible al lavado que el  $\text{NO}_3^{-2}$ , el azufre debe ser considerado como un nutriente móvil, al igual que el nitrógeno. Por ello no es recomendable la filosofía de “reconstrucción y mantenimiento” para el caso del azufre.

En este sentido, se ha hecho énfasis en intentar utilizar el análisis de  $\text{SO}_4^{-2}$  en el suelo como indicador de disponibilidad o capacidad de aporte del suelo. Sin embargo este análisis presenta la limitación de que no indica con la certeza deseable si ocurrirá deficiencia en casos de niveles de  $\text{SO}_4^{-2}$  bajos (<6 mg/kg). Esto se fundamenta entre otras razones en que no considera el S mineralizado durante el ciclo del cultivo, y que tampoco considera el S disponible en el horizonte B.

La cantidad de S a aplicar a un cultivo podría estimarse en base a la cantidad de S que extraerá el cultivo con un cierto rendimiento esperado o en base a la cantidad total que requiere absorber el cultivo (grano + residuos). A modo de ejemplo para el caso de trigo se puede asumir 0.15% S en grano, 4000 kg/ha, y un índice de cosecha de S de 43%. Los resultados de la extracción de S en grano y la cantidad total de S en el cultivo, ascienden respectivamente a 6 y 14 kg S/ha. Considerando la respuesta en grano y la eficiencia de utilización, las cantidades estimadas de fertilizante azufrado coinciden en promedio con los valores más frecuentemente encontrados para obtener el máximo físico:

20 a 30 kg de S/ha. En tanto no se cuente con un método más apropiado, el análisis de  $\text{SO}_4^{-2}$  provee una guía rudimentaria pero que acompañada del conocimiento de los requerimientos de S de un cultivo y la extracción de S en la cosecha, posibilita un manejo razonablemente bueno del nutriente, evitando aplicar S por las dudas o en exceso.