

# El azufre en los agro-ecosistemas: corrección de suelos y fertilización de cultivos

M.TORRES DUGGAN<sup>1,2,3</sup>, M.B. RODRÍGUEZ<sup>4</sup> & J.A. LAMELAS<sup>1</sup>

## RESUMEN-

El azufre (S) cumple importantes funciones en la nutrición vegetal. La fertilización azufrada es una práctica en expansión en diversos países alrededor del mundo. En América del Sur, la Argentina y Brasil son los países con mayor demanda de fertilizantes azufrados. La mayor parte de los fertilizantes azufrados utilizados en los agro-ecosistemas son fuentes solubles, que presentan el S en forma de  $\text{SO}_4^{2-}$ , de inmediata disponibilidad para las plantas. Sin embargo, en los últimos años se observa en el mercado regional mayor oferta de fertilizantes compuestos (e.g. NPS) que incluyen  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{S}^0$  micronizado. Por otro lado, el yeso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), además de ser una fuente azufrada muy utilizada en la Argentina y otros países en fertilización de cultivos, se la considera la principal enmienda en corrección química de suelos sódicos. Asimismo, en sistemas de producción en siembra directa donde se realiza aplicación de carbonatos (prácticamente insolubles en agua), la aplicación de yeso agrícola mejora la eficiencia de la enmienda calcárea, debido al efecto en la solubilización del calcio (Ca) y mayor movilidad en el perfil.

## 1. Introducción

El azufre (S) cumple un rol clave en el crecimiento de los cultivos. Es constituyente de aminoácidos esenciales y participa en procesos bioquímicos importantes como la biosíntesis de lípidos y proteínas; fotosíntesis; fijación biológica de nitrógeno (N), entre otros (Mengel y Kirby [1]; Rice [2]). Asimismo, una adecuada nutrición azufrada mejora la calidad de los productos cosechados, como se ha reportado en diversos cultivos, principalmente oleaginosas y cultivos hortícolas (Wang et al. [3]).

Además de la importancia del S en la nutrición vegetal, resulta importante considerar la utilización de algunos minerales como el yeso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) que además de proveer S, aportan Ca soluble que mejora la condición físico-química de suelos sódicos; como así también suelos ácidos y/o acidificados por el uso agrícola.

Si bien conceptualmente se distingue entre la práctica de fertilización azufrada (aporte de S para los cultivos) de la corrección química de suelos (mejorar la condición físico-química del suelo), en casos puede ser necesarios cubrir ambas limitaciones de fertilidad. El objetivo del presente trabajo es caracterizar y discutir algunos aspectos de la fertilización azufrada y la corrección de suelos sódicos y ácidos en agro-ecosistemas sudamericanos, principalmente de Argentina y Brasil.

**2. Palabras-Clave:** azufre, fertilizantes azufrados, yeso agrícola, corrección de suelos

## 3. Panorama del uso de fertilizantes y enmiendas azufradas en América del Sur

### 3.1. Utilización de yeso agrícola en corrección de suelos

Existen muy pocas estadísticas confiables sobre las cantidades de yeso agrícola utilizadas como enmiendas en la agricultura sudamericana. Algunas aproximaciones indican que entre el 10 y 35% del consumo global de yeso natural se utiliza como enmienda en la agricultura (Izquierdo González [4]).

<sup>1</sup> Tecnoagro S.R.L, Tel: (+54) 11 4-553-2474. Buenos Aires, Argentina. Email: [torresduggan@tecnoagro.com.ar](mailto:torresduggan@tecnoagro.com.ar)

<sup>2</sup> Docente regular en la Carrera de Especialización en Fertilidad del suelo y Fertilización, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

<sup>3</sup> Coordinador de Comisiones Científicas. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS).

<sup>4</sup> Prof. Adjunta, Cátedra Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

En la Argentina existe una amplia disponibilidad de yacimientos de yeso agrícola ubicados en diferentes regiones, de donde se extrae el mineral para ser comercializado en la industria y la agricultura (Ponce y Torres Duggan [5]). Además del uso tradicional como enmienda en ambientes con suelos sódicos, en los últimos años se evidencia un renovado interés en la investigación de la acidificación de suelos en agro-ecosistemas templados de la Argentina (Vázquez [6]). En estos ambientes, donde el sistema de labranza dominante es la siembra directa, la aplicación superficial de carbonatos presenta baja efectividad debido a que estas enmiendas son prácticamente insolubles en agua. En este contexto, la aplicación de los carbonatos con el yeso agrícola incrementa la solubilización del Ca y su movilidad en el perfil. Este aspecto será ampliado más adelante en este escrito.

En Brasil, las condiciones agro-ecológicas son muy diferentes a las imperantes en el área templada de la Argentina. La principal problemática de fertilidad de los suelos brasileros es la acidez (i.e bajo pH y saturación de bases, toxicidad de Al). Asimismo, los suelos presentan muy bajos contenidos de MO y nutrientes (Scheid Lopes et al. [7]). En estos agro-sistemas, la aplicación de carbonatos de calcio (calcita) y/o carbonato de calcio y magnesio (dolomita) es una práctica frecuente en los sistemas de producción para aumentar el pH y aportar bases a los cultivos (Ponce y Gambaudo [8]). En estos sistemas, también se está evaluando la aplicación conjunta de yeso agrícola y carbonatos. La utilización de yeso agrícola en estos suelos cumple varios objetivos diferentes: proveer Ca y S a los cultivos; incrementar la concentración de Ca en profundidad; reducir la actividad de Al en capas sub-superficiales; incrementar la eficiencia de uso de nutrientes (Ponce y Torres Duggan [5]; Watanabe [9]). A pesar de dichos beneficios reportados en la literatura científica, la aplicación conjunta de carbonatos y yeso agrícola no es una práctica frecuente en los sistemas de producción.

Se destaca en Brasil la importante oferta de fosfo-yeso (millones de toneladas) en diferentes estados de Brasil (Scheid Lopes et al. 2007 [7]). Los mismos se obtienen como sub-producto de la producción de fertilizantes fosfatados. Generalmente se comercializan y aplican en el área de influencia de dichas plantas de producción. Sin embargo, la calidad del producto

no siempre es adecuada para el manejo y aplicación a campo (e.g. alto contenido de humedad).

### 3.2. Uso de fertilizantes azufrados

Los principales países de América del Sur donde se demandan fertilizantes azufrados son Argentina y Brasil (Torres Duggan et al. [10]). En estos países se verificó un marcado aumento en el consumo de fertilizantes azufrados en los últimos tiempos (Figura 1).

En Argentina, la mayor parte de la demanda de S con destino a la fertilización de cultivos se origina en la Región Pampeana, principal zona de producción de granos del país (trigo, cebada, maíz, sorgo, soja, girasol) y donde se consume el 80% de los fertilizantes del país. Actualmente la fertilización azufrada es una práctica muy instalada en los sistemas de producción, y el S constituye el tercer nutriente limitante del rendimiento de los cultivos luego del N y del fósforo (P).

En Brasil, tradicionalmente se prestó poca atención al S como nutriente agrícola. Sin embargo, desde hace unos años, se observa un renovado interés en el mismo y se lo considera uno de los principales condicionantes del rendimiento de los cultivos en sistemas de alta producción (Alvarez [11]; Stipp & Casarin [12]). Al igual que en la Argentina, en Brasil tuvo lugar un significativo aumento de la demanda de S (Figura 1).

En otros países como Bolivia y Uruguay, la fertilización azufrada es una práctica poco frecuente en la actualidad. Bolivia presenta una agricultura con escaso uso de insumos en general y de fertilizante en particular (mercado incipiente). Por el contrario, Chile presenta un mercado de fertilizantes maduro (i.e. consumo de nutrientes estabilizado), y se realiza fertilización azufrada principalmente en el sur del país (Mora et al. [13]; Alfaro et al. [14]). Asimismo, en el norte del país existe un uso significativo de S en forma de enmiendas, principalmente yeso agrícola y azufre elemental. En las demás áreas del país, la escasa aplicación de S se puede deber a la importante extensión con suelos afectados por sales, con alto contenido de sulfatos.

En Paraguay existe muy poca información sobre aplicación de S en fertilización y/o corrección

<sup>1</sup> Tecnoagro S.R.L, Tel: (+54) 11 4-553-2474. Buenos Aires, Argentina. Email: [toresduggan@tecnoagro.com.ar](mailto:toresduggan@tecnoagro.com.ar)

<sup>2</sup> Docente regular en la Carrera de Especialización en Fertilidad del suelo y Fertilización, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

<sup>3</sup> Coordinador de Comisiones Científicas. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS).

<sup>4</sup> Prof. Adjunta, Cátedra Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

química de suelos. Sin embargo, se están llevando a cabo investigaciones tendientes a evaluar la aplicación de yeso agrícola en tratamientos con y sin aplicación de cal agrícola en suelos ácidos, práctica que podría resultar interesante para mejorar los suelos ácidos en siembra directa (Watanabe [9]).

#### **4. Utilización de yeso agrícola en suelos sódicos**

##### **4.1. Diagnóstico integral**

Es importante resaltar que la “rehabilitación” de suelos sódicos requiere de un diagnóstico integral donde se consideran diferentes prácticas agronómicas con diferente grado de complejidad, que involucra diversos factores como el relieve y el tipo de suelos, dinámica de la capa freática, análisis de la vegetación, prácticas de sistematización del suelo, etc. El abordaje en detalle de este tema escapa el alcance de este trabajo, y para ello se puede consultar revisiones del tema como las de Cisneros et al. [15]. La evaluación de la necesidad de aplicación de yeso agrícola debe considerar el origen de la sodicidad y las características del tipo de suelo (e.g. profundidad y presencia de horizontes nátricos, drenaje, etc.).

La reacción teórica del yeso agrícola en el suelo se basa en un equilibrio químico, en donde el Ca de la enmienda reemplaza (parcialmente) el sodio (Na) adsorbido en las arcillas (Lavado [16]). La aplicación de yeso agrícola floccula el suelo cuando está disperso o previene la dispersión del mismo en suelos que se están sodificando. El principal efecto del yeso agrícola es incrementar la tasa de infiltración de agua en el suelo. Es importante tener claro que, en términos generales, la eficiencia del yeso agrícola es baja. Si bien la persistencia de los efectos de la aplicación puede mantenerse en años subsecuentes, esto depende de que el nivel freático no aporte sodio nuevamente al perfil.

Se conocen varios modelos para estimar la dosis de enmienda a aplicar. Los mismos utilizan diferentes propiedades del suelo (e.g. C.I.C., P.S.I.), como así también las características de la enmienda; del sistema de producción o datos de ensayos de campo (Lavado, [16]). Cuando no se dispone de información experimental local, se puede estimar preliminarmente la dosis de acuerdo a los miliequivalentes de Na que se requiere reemplazar. Para que la práctica resulte

efectiva, es necesario que el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  generado en la reacción de intercambio sea lavado fuera del sistema suelo (Ponce y Torres Duggan [5]). Para ello es fundamental que exista adecuado drenaje interno (natural o artificial).

##### **4.2. Calidad del yeso agrícola**

Una de las características de los agro-minerales como el yeso agrícola es su heterogeneidad mineralógica. Así, pureza del mineral resulta un atributo de calidad importante a evaluar. En relevamientos efectuados recientemente en la Argentina, se observó una marcada variabilidad en el porcentaje de  $\text{Ca}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$  presente en muestras de yeso agrícola obtenidas del mercado local (Figura 2). En cuanto a la granulometría, cuando el yeso se utiliza como enmienda, se utilizan tamaños de partículas finas (polvo), mientras que cuando se lo aplica como fertilizante se utilizan las mismas granulometrías que en fuentes azufradas convencionales (1-5 mm o 2-5 mm). En la Argentina se dispone de la Norma IRAM N°22452/2006 de “Yeso para uso agrícola” que establece requisitos físicos y químicos para su uso como fertilizante y enmienda (Rodríguez y Torres Duggan [17,18])

##### **4.3. Métodos de aplicación**

Tradicionalmente la aplicación del yeso agrícola consiste en la incorporación y mezclado con el suelo a través de la labranza. Esto permite aumentar la reactividad de la enmienda en el suelo. Sin embargo, debido a la difusión de la siembra directa, estos modelos de recomendación fueron perdiendo vigencia. En estos sistemas, la aplicación del yeso agrícola se realiza al voleo en superficie. Esta enmienda es considerablemente más soluble que los carbonatos y en general cuando existe balance hídrico positivo (ya sea generado por riego o lluvias), el Ca va penetrando en el perfil. La aplicación de dosis bajas anuales también es una opción interesante que facilita la logística de aplicación a campo.

En suelos fuertemente sódicos, como Natracualfes ubicados en la Pampa Deprimida argentina, se han evaluado diferentes técnicas de aplicación, como la aplicación localizada de yeso en bandas cercanas al surco de siembra (intersiembra de forrajeras adaptadas). La disponibilidad de maquinaria y de enmiendas en el sitio de producción constituyen factores claves para

<sup>1</sup> Tecnoagro S.R.L, Tel: (+54) 11 4-553-2474. Buenos Aires, Argentina. Email: [torresduggan@tecnoagro.com.ar](mailto:torresduggan@tecnoagro.com.ar)

<sup>2</sup> Docente regular en la Carrera de Especialización en Fertilidad del suelo y Fertilización, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

<sup>3</sup> Coordinador de Comisiones Científicas. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS).

<sup>4</sup> Prof. Adjunta, Cátedra Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

decidir la aplicación de correctivos químicos como parte de la rehabilitación y/o mejora de estos ambientes. La eficiencia del enyesado y su persistencia es variable y dependen de distintos factores como la dinámica de las napas, el grado de hidro y halomorfismo, el drenaje interno, etc.

## 5. Utilización de yeso agrícola en suelos ácidos o acidificados

### 5.1. Diagnóstico integral

Al igual que lo mencionado antes para la corrección de suelos sódicos, el diagnóstico de la acidez es el paso clave sobre el cual se deben basar las decisiones de aplicación de enmiendas. En este contexto, es importante diferenciar los agro-ecosistemas subtropicales y/o tropicales, donde los suelos dominantes son genéticamente ácidos (e.g. Oxisoles, Ultisoles) de aquellas regiones templadas, donde la acidificación, en términos generales, se origina en el uso agrícola (e.g. balances de bases negativos; aplicación de altas dosis de fertilizantes amoniacales, entre los más frecuentes). Así, en la Región Pampeana argentina (clima templado y suelos Molisoles), en los últimos años se han reportado algunos procesos de acidificación moderados y respuestas a la aplicación de enmiendas cálcicas y/o cálcico-magnésicas en cultivos de grano y alfalfa. Este proceso no es generalizado, sino que se localiza en suelos con prolongada historia agrícola y/o donde ocurre una elevada extracción de Ca y Mg (Vázquez et al. [19,20]). El diagnóstico de la necesidad de aplicación de enmiendas se basa en la evaluación de propiedades edáficas y jerarquización de las mismas. Algunas de las variables consideradas son: pH; concentración de bases intercambiables y relación entre las mismas; tipo de suelo; características del cultivo; etc.

A diferencia de lo descripto para los ambientes templados de la Argentina, en los agro-ecosistemas brasileros, como se mencionó, los suelos son genéticamente ácidos y la aplicación de carbonatos es una práctica frecuente y necesaria para el logro de cultivos de alta productividad. A pesar de existir algunos antecedentes académicos sobre la aplicación de yeso agrícola en estos ambientes, la misma no es una práctica frecuente utilizada por los productores agropecuarios. Actualmente la expansión agrícola brasilerá se está desarrollando principalmente en la región de

los *Cerrados* (sabana ubicada en el centro-oeste del país) con suelos Oxisoles. Al igual que en la Argentina, el principal cultivo en los planteos de producción es soja, que por ser una leguminosa, presenta altos requerimientos de bases. Así, esta región se la puede considerar con potencial para el uso del yeso agrícola. Sin embargo, se deben analizar factores críticos como la disponibilidad de yeso agrícola en la zona y el abastecimiento del mismo hacia las áreas de demanda.

Se han desarrollado diferentes modelos de diagnóstico de necesidades de aplicación de yeso agrícola para mejorar las condiciones físico-químicas en suelos tropicales de Brasil. Así, se evalúan propiedades edáficas (e.g. % de arcilla; concentración de Ca o de Al intercambiable, etc.) y del tipo de cultivo (e.g. cultivos anuales, cultivos perennes) (Ponce y Torres Duggan [5]; Stipp y Casarin [12]; Watanabe [9]).

### 5.2. Métodos de aplicación

En los últimos años se destaca una marcada expansión de la siembra directa en la Argentina y en la mayoría de los países de América del Sur (e.g. Brasil, Paraguay, Uruguay) (Torres Duggan et al. [10]; Cubilla et al. [21]). Este cambio en el sistema de labranza modificó considerablemente el contexto de los sistemas de producción, requiriendo de nuevos enfoques en el manejo de suelos y cultivos, como así también demandando nueva información experimental sobre la cual basar las prácticas agronómicas. Uno de los desafíos que surgen es cómo lograr una alta eficiencia de las enmiendas en aplicaciones en superficie, sin remoción mecánica, en especial cuando se aplican carbonatos, que son prácticamente insolubles en agua. Una de las soluciones propuestas en el ámbito científico, es la utilización del yeso agrícola en conjunto con los carbonatos. El yeso agrícola, por tratarse de un mineral soluble en agua, mejora la solubilización del Ca en el perfil del suelo, debido a su efecto en la lixiviación de bases (Vázquez et al. [22]; Watanabe [9]).

Por otro lado, en sistemas en donde aún no se inició la siembra directa se puede aprovechar la última labor de preparación de la cama de siembra para realizar una corrección inicial. Este tipo de criterios se utilizan en aplicaciones de carbonatos e inclusive de fertilizantes fosfatados y potásicos. Por el contrario, en áreas templadas de la Argentina (Molisoles), donde el 80% del área

<sup>1</sup> Tecnoagro S.R.L, Tel: (+54) 11 4-553-2474. Buenos Aires, Argentina. Email: [torresduggan@tecnoagro.com.ar](mailto:torresduggan@tecnoagro.com.ar)

<sup>2</sup> Docente regular en la Carrera de Especialización en Fertilidad del suelo y Fertilización, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

<sup>3</sup> Coordinador de Comisiones Científicas. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS).

<sup>4</sup> Prof. Adjunta, Cátedra Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

sembrada se realiza en siembra directa, los criterios más recientes consideran aplicaciones anuales de enmiendas cálcicas y/o cálcico-magnésicas, en dosis bajas, de un modo similar a la fertilización convencional.

## 6. Fertilización azufrada

### 6.1 Diagnóstico y modelos de fertilización

Los análisis de suelos se utilizan frecuentemente para predecir la disponibilidad de S para los cultivos. Sin embargo, el éxito de los mismos ha sido variable según la región (Mikkelsen & Norton, [23]). El análisis de la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el suelo es uno de los métodos más utilizados. Existen diferentes extractantes que permiten evaluar el contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$  en la solución del suelo, el adsorbidos y en algunos casos el S orgánico. En Argentina, los extractantes más utilizados son el fosfato de calcio, acetato de amonio y fosfato de potasio (Russi et al. [24]). Asimismo, a pesar de los diferentes extractantes utilizados por los laboratorios los mismos obtienen resultados similares, sugiriendo que el uso del mismo extractante no es un pre-requisito para estandarizar resultados de análisis de suelos para evaluar la disponibilidad de S para las plantas (Russi et al. [24]). En términos generales, no se han observado relaciones consistentes y estables entre la respuesta a la aplicación de S y la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el suelo a la siembra o con otras variables de suelo o de manejo (Gutiérrez Boem [25]). Sin embargo existen algunas excepciones, principalmente en la Región Pampeana central (i.e. Pampa Plana, Pampa Ondulada), donde se han reportado umbrales preliminares de 10 ppm de S- $\text{SO}_4^{2-}$  en redes de ensayos de larga duración (García et al. [26]). Debido a las dificultades mencionadas para predecir la respuesta a la aplicación de S en base al contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el suelo, el enfoque actual utilizado en recomendaciones de fertilización azufrada en los sistemas de producción de la Argentina tienen en cuenta, además de la referencia del contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$ , otros factores o condiciones ambientales del sitio de producción (e.g. antecedentes de respuesta a la fertilización azufrada en la zona o en propio campo; antecedentes de respuestas a N o P; estado de degradación del suelo; nivel de productividad de los cultivos). Independientemente del método de diagnóstico utilizado, de acuerdo con revisiones recientes, las respuestas a la aplicación de S en los agro-ecosistemas pampeanos son rentables y se

maximizan con dosis de 15-20 kg/ha de S. El hecho que las deficiencias de S se encuentren bastante generalizadas geográficamente, y que las mismas sean rentables, estimulan la adopción de la fertilización azufrada.

Más recientemente, y a nivel de investigación, se han evaluado en la Argentina algunas herramientas de diagnóstico alternativas al análisis de suelos, basadas en el análisis de tejido en el cultivo de trigo (e.g. relación N/S en planta entera en el estadio Z31) o de evaluaciones del índice de verdor en el canopeo de maíz en el estadio de V6-V14 (Echeverría et al. [27]; Pagani & Echeverría, [28]). Debido a que algunas investigaciones recientes muestran que los cultivos absorben y acumulan S aún en estadios ontogénicos tardíos, ampliaría la ventana de tiempo disponible para evaluar el estatus nutricional de los cultivos y definir la aplicación de S en estadios del ciclo algo más tardíos que los frecuentemente utilizados en la fertilización nitrogenada.

En cuanto al diagnóstico de disponibilidad de S en Brasil, el contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$  es una variable considera predictiva de la disponibilidad de S, y presentan buenas calibraciones en diversas zonas (Stipp y Casarin, [12]). Los límites críticos utilizados varían según el tipo de suelo, principalmente contenido de arcilla. Así, en suelos arcillosos los umbrales críticos varían entre 10 a 35 ppm de S- $\text{SO}_4^{2-}$  (>40% de arcilla), mientras que en suelos más arenosos (<40% de arcilla) los mismos se ubican en un rango de 3 a 9 ppm de S- $\text{SO}_4^{2-}$ , tanto en la capa superficial (0-20 cm) como subsuperficial (20-40 cm). Asimismo, se consideran otros factores como los análisis de plantas; contenido de MO; requerimiento de los cultivos; contenido de S en aguas de riego; relación entre el N y el S para alcanzar altos rendimientos (Álvarez [11] ; Stipp & Casarin [12]). En general, independientemente del modelo de fertilización utilizado, las dosis aplicadas se ubican en un rango que va de 10-20 kg/ha de S a 40 kg/ha de S dependiendo del tipo de cultivo (perenne, anual) y la estrategia de aplicación (corrección inicial, dosis anuales, etc.).

### 6.2. Fuentes azufradas y métodos de aplicación

Existe una amplia variedad de fuentes azufradas utilizadas en fertilización de cultivos. Se pueden diferenciar dos tipos principales: (1) fuentes que presentan el S en forma de  $\text{SO}_4^{2-}$  (solubles en

<sup>1</sup> Tecnoagro S.R.L, Tel: (+54) 11 4-553-2474. Buenos Aires, Argentina. Email: [torresduggan@tecnoagro.com.ar](mailto:torresduggan@tecnoagro.com.ar)

<sup>2</sup> Docente regular en la Carrera de Especialización en Fertilidad del suelo y Fertilización, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

<sup>3</sup> Coordinador de Comisiones Científicas. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS).

<sup>4</sup> Prof. Adjunta, Cátedra Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

agua) y (2) azufre elemental ( $S^0$ , insoluble en agua) (Til [29]). Todas las fuentes sulfatadas presentan el S en forma biodisponible para las plantas. Por el contrario, el  $S^0$  se debe oxidar en el suelo antes de proveer S disponible, proceso regulado principalmente por el tamaño de las partículas del  $S^0$  (a menor superficie específica, mayor tasa de oxidación), la humedad y la temperatura edáfica.

En la Argentina, las fuentes azufradas más utilizadas son: superfosfato simple de calcio (SFS; 9% de P), yeso agrícola (15-18% de S; 22% de Ca) y tiosulfato de amonio (TSA; 26% de S y 12% de N) (Torres Duggan et al. [10]. Este último fertilizante se lo utiliza en mezclas con UAN. Es importante resaltar que la Argentina es el principal mercado de fertilizantes líquidos de América del Sur.

En Brasil, los principales fertilizantes azufrados utilizados en los sistemas de producción son el sulfato de amonio (24% de S y 21% de N); SFS y yeso agrícola (Stipp & Casarin [12]. A pesar de tener campos con grandes superficies y condiciones para el desarrollo de fertilizantes fluidos, actualmente la utilización de fertilizantes líquidos en Brasil es muy bajo, y se lleva a cabo principalmente en algunos cultivos industriales como la caña de azúcar, donde se aplica UAN.

En los últimos años se observa mayor oferta de fertilizantes compuestos (e.g. mezclas químicas con N, P y S) que incluyen  $S^0$  micronizado y  $S-SO_4^2$ . Si bien la utilización de  $S^0$  en fertilización de cultivos no es una práctica nueva, se progresó considerablemente en las innovaciones utilizadas en los procesos de granulación de fuentes convencionales como el MAP que permiten incorporar partículas muy finas de  $S^0$  en la matriz de los gránulos (e.g.  $<40 \mu m$  y aún más pequeñas). Desde el punto de vista de la industria de fertilizantes, la principales ventajas de estos productos son la mayor seguridad en el uso de  $S^0$  durante la etapa de producción del fertilizante. Desde el punto de vista agronómico, una ventaja interesante de estas fuentes es la de ofrecer una relación P/S más equilibrada para el cultivo de soja, el más sembrado en la agricultura de secano de América del Sur.

En términos generales, se han observado pequeñas diferencias en efectividad agronómica (respuestas) entre fuentes sulfatadas utilizadas en cultivos de grano en Argentina y Brasil (Torres Duggan et al.

[10]). Así, todas las fuentes que contienen el S en forma de  $SO_4^{2-}$  tienen la misma capacidad para proveer S disponible para las plantas.

A diferencia del panorama mencionado antes para las fuentes sulfatadas, existe muy poca información publicada en cuanto a la efectividad agronómica relativa del  $S^0$  en relación a las fuentes sulfatadas. Sin embargo, en los últimos años se han reportado algunos estudios promisorios en cuanto a las respuestas a la aplicación de  $S^0$  micronizado en cultivos anuales (cereales y oleaginosas) en la Pampa Ondulada y Plana de la Región Pampeana argentina (Tysco y Rodríguez [30]; Torres Duggan et al. [31] y Torres Duggan [32]), como así también en el *Cerrado* brasileiro (De Miranda et al. [33]. Estos resultados indican, preliminarmente una adecuada capacidad de oxidación del  $S^0$  en dichas regiones. Sin embargo, es necesario generar más información sobre el funcionamiento de las diferentes fuentes de  $S^0$  disponibles en el mercado en diferentes condiciones agro-ecológicas. En la Figura 3 se muestra un modelo conceptual del funcionamiento de fuentes sulfatadas y del  $S^0$  según las características del ambiente (humedad y temperatura en el suelo) y granulometría del  $S^0$  en el área de influencia de la Pampa Ondulada y Plana de Argentina.

En cuanto a los métodos de aplicación de S, como en cualquier nutriente, el objetivo subyacente es lograr la mayor sincronía posible entre la oferta del nutriente (suelo y/o fertilizante) y la demanda del cultivo. Así, el momento y forma de aplicación es variable de acuerdo al tipo de suelo, condiciones agro-ecológicas y características del sistema productivo. En la Región Pampeana argentina, donde los suelos presentan baja capacidad de fijación de  $SO_4^{2-}$  y donde el proceso de lixiviación de  $SO_4^{2-}$  parecería no ser una pérdida significativa de S (en suelos con texturas medias), no se han observado diferencias significativas entre diferentes momentos o formas de colocación del S en cultivos de grano (e.g. voleo vs. bandas) (Prystupa et al. [34]. Por el contrario, en suelos tropicales de Brasil, debido a la fijación de  $SO_4^{2-}$ , las aplicaciones en bandas a la siembra son más eficientes que las aplicaciones al voleo en cobertura total (Stipp & Casarin [12]). De hecho, los modelos de fertilización consideran este aspecto duplicando la dosis en aplicaciones al voleo en relación a bandas a la siembra. Asimismo, las abundantes precipitaciones anuales

<sup>1</sup> Tecnoagro S.R.L, Tel: (+54) 11 4-553-2474. Buenos Aires, Argentina. Email: [torresduggan@tecnoagro.com.ar](mailto:torresduggan@tecnoagro.com.ar)

<sup>2</sup> Docente regular en la Carrera de Especialización en Fertilidad del suelo y Fertilización, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

<sup>3</sup> Coordinador de Comisiones Científicas. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS).

<sup>4</sup> Prof. Adjunta, Cátedra Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

en las principales zonas de secano del país pueden ocasionar pérdidas por lixiviación de  $\text{SO}_4^{2-}$ , factor que puede incidir de un modo diferente según el método de aplicación que se utilice. Este aspecto ha sido poco estudiado tanto en Brasil como en la Argentina.

La residualidad del S en las secuencias de cultivos en las áreas templadas de la Argentina ha sido extensamente observada en la mayoría de los sistemas de producción. Así, es posible aplicar el P y el S en el cultivo de trigo para cubrir la demanda del doble cultivo trigo/soja de 2° o cebada/soja de 2° obteniendo las mismas eficiencias de uso de los nutrientes comparado con aplicaciones en cada cultivo en forma independiente. En Brasil, este tema ha sido menos explorado.

## 6. Referencias

- [1] MENGEL, K. AND E.A. KIRBY. 2000. Principios de nutrición vegetal. 4ª Edición. 1° en español. Instituto Internacional de la Potasa. Basilea, Suiza., pp. 607.
- [2] RICE, R.W. 2007. The physiological role of minerals in the plant. In: Mineral nutrition and plant disease (Datnoff, L.E., Elmer, W.H., Huber, D.M., eds). Chapter 2. The American Phytopathological Society, St. Paul, Minnesota, USA. pp. 9-30.
- [3] WANG, ZH.; S.X. LI AND S. MALHI. 2008. Effects of fertilization and other agronomic measures on nutritional quality of crops. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88: 7-23.
- [4] IZQUIERDO GONZÁLEZ, N. 2005. Panorama del mercado del yeso. En: En: *Minerales para la agricultura en Latinoamérica* (Nelson, H., Sarudianski, R., eds). Capítulo VI, CyTED UNSAM-OLAMI., p 508-510.
- [5] PONCE, B; M. TORRES DUGGAN. 2005. Yeso. En: *Minerales para la agricultura en Latinoamérica* (Nelson, H., Sarudianski, R., eds). Capítulo VI, CyTED UNSAM-OLAMI., p 425-516.
- [6] VÁZQUEZ, M. 2011. Causas de la acidificación en el ámbito templado argentino, consecuencias y avances para su diagnóstico. En: *Simposio Fertilidad 2011. La nutrición de cultivos integrada al sistema de producción*. F.O. García & A. Correndo (eds.). p. 13-29
- [7] SCHEID LOPES, A.S., GUIMARAES GUILHERME, L.R. 2007 (a). Fertilidad de solo e productividad agrícola. En: *Fertilidade do Solo*. Ferreira Novais, R. ; Alvarez, V.H.; De Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Bertola Cantarutti, R.; Lima Neves, J.C. (editores). Sociedade Brasileira de Ciencia del Suelo. 1017 p.
- [8] PONCE, B; S. GAMBAUDO. 2005. Carbonatos. En: *Minerales para la agricultura en Latinoamérica* (Nelson, H., Sarudianski, R., eds). Capítulo V, CyTED UNSAM-OLAMI., p 303-424
- [9] WATANABE, S.Y. 2013. Aplicación de yeso y cal agrícola en la sucesión soja-trigo en un Ultisol. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias del Suelo y Ordenamiento Territorial. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción. 114 p.
- [10] TORRES DUGGAN, M.; MELGAR, R.; RODRIGUEZ, M.B.; LAVADO, R.S.; CIAMPITTI, I.A. 2012. Sulfur fertilization in the argentine Pampas region: a review. *Agronomia & Ambiente*, 32 (1-2) 61-73.
- [11] ALVAREZ, V.H.V. ENXOFRE. 2007. En: *Fertilidade do Solo*. Ferreira Novais, Alvarez V.H.V.; De Barros, NF; Fontes, R.L.F; Cantarutti, R.B e Lima Neves, J.C. (Editores). 1017 p.
- [12] STIPP, S.R; V. CASARIN. 2010 *Informacoes Agronomicas* N° 129, IPNI Brasill., pp. 14-20
- [13] MORA, M.; P. CARTES; R. DEMANET; I.S. CORNFORTH. 2002. Effects of lime and gypsum on pasture grown and composition on an acid andisol in Chile, South America. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal*, 33: 2069-2081.
- [14] ALFARO, M.; R. BERNIER; S. IRAIRA. 2006. Efecto de fuentes de azufre sobre el rendimiento y calidad de trigo y praderas en dos Andisoles. *Agricultura Técnica* (Chile). 66 (3): 283-294
- [15] CISNEROS, J.M.; DEGIOANNI, A.; J. J. CANTERO; A. CANTERO. 2008. Caracterización y manejo de suelos salinos en el área Pampeana. En: *La salinización de suelos en la Argentina, su impacto en la producción agropecuaria*. E. Taleisnik; K. Grunberg & G. Santa María (eds). Capítulo 2. Editorial Universidad Católica de Córdoba. P 17-46
- [16] LAVADO, R.S. 2010. Salinidad y alcalinidad: propiedades, efectos sobre los cultivos y manejo. En: *Fertilidad de suelos, caracterización y manejo en la Región Pampeana*. Sección 1, Capítulo 3. R. Alvarez, G. Rubio, C. R. Alvarez & Raúl S. Lavado (Eds). Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. p 21-44.
- [17] RODRÍGUEZ, M..B.; M. TORRES DUGGAN. 2012. Caracterización de los fertilizantes y su calidad agronómica. En: *Fertilización de Cultivos y Pasturas*. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Capítulo 1. Sección 2. Álvarez, R; Prystupa, P; Rodríguez, M.; Álvarez, C. (editores). Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. P 327-366.
- [18] RODRÍGUEZ, M.B.; M. TORRES DUGGAN. 2012. Caracterización de enmiendas minerales y orgánicas En: *Fertilización de Cultivos y Pasturas*. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Capítulo 2. Sección 2. Álvarez, R; Prystupa, P; Rodríguez, M.; Álvarez, C. (editores). Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. p 367-380.
- [19] VÁZQUEZ, M. TERMINIELLO, A.; CASCIANI, A.; MILLÁN; G.; GELATI, P.; GUILINO, F.; J. GARCÍA DIAZ.; J.; KOSTIRIA; M. GARCÍA. 2010. Influencia del agregado de enmiendas básicas sobre la

<sup>1</sup> Tecnoagro S.R.L, Tel: (+54) 11 4-553-2474. Buenos Aires, Argentina. Email: [torresduggan@tecnoagro.com.ar](mailto:torresduggan@tecnoagro.com.ar)

<sup>2</sup> Docente regular en la Carrera de Especialización en Fertilidad del suelo y Fertilización, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

<sup>3</sup> Coordinador de Comisiones Científicas. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS).

<sup>4</sup> Prof. Adjunta, Cátedra Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en ámbitos templados argentinos. *Ciencia del Suelo*. 28 (2):141-154

[20] VÁZQUEZ, M. TERMINIELLO, A.; CASCIANI, A.; MILLÁN; D. CANOVA; G.; GELATI, P.; F. GUILINO; A. DORRONZORO; Z. NICORA; L. LAMARCHE, M. GARCÍA. 2012. Respuesta de la soja (*Glycine Max* L. Merr) a enmiendas básicas en suelos de las provincias de Buenos Aires y Santa Fe. *Ciencia del Suelo*. 30 (1): 43-55.

[21] CUBILLA, A.; A. WENDLING; F. L.F. ELTZ; T. J.C. AMADO; J. MIELNICZUK. 2012. Recomendaciones de fertilización para soja, trigo, maíz y girasol bajo siembra directa en el Paraguay. CAPECO. 88 p.

[22] VÁZQUEZ, M.; A. TERMINIELLO; G. MILLÁN; I. DAVEREDE; E. BARIDON. 2013. Dynamics of soil liming materials broadcast on a thaptoargic Hapludoll soil in Argentina. *Ciencia del Suelo*. 31 (1): 23-32.

[23] MIKKELSEN, R.; R. NORTON. 2013. Soil and fertilizer sulfur. *Better Crops*. 97 (2). 9 p.

[24] Russi, D.; Gutiérrez Boem, Prystupa, P.; Rubio, G. 2012. Communication in Soil Science and Plant Analysis 43:2535-2543.

[25] GUTIRERREZ BOEM, F. 2010. Regulación y diagnóstico de la disponibilidad de azufre. En: Fertilidad de suelos, caracterización y manejo en la Región Pampeana. Sección 4, Capítulo 2. R. Álvarez, G. Rubio, C. R. Álvarez & Raúl S. Lavado (Eds). Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. p 337-352.

[26] GARCÍA, F.O.; M. BOXLER, A. BERARDO; I.A. CIAMPITTI; A. CORRENDO; N. REUSSI CALVO; F. BAUSCHEN; L. FIRPO; J. MINTEGUIAGA AND R. POZZI. 2010. La red de nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009, IPNI-CREA-ASP. Segunda Edición,. 63 p.

[27] ECHEVERRÍA, H.; N. REUSSI CALVO; A. PAGANI, L. FERNÁNDEZ. 2011. Métodos de diagnóstico de deficiencias de azufre en los cultivos de trigo, soja de segunda y maíz. En: Simposio Fertilidad 2011. La nutrición de cultivos integrada al sistema de

producción. F.O. García & A. Correndo (eds.). p. 98-107

[28] PAGANI, A.; ECHEVERRÍA, H.E. 2012. Influence of sulfur deficiency on chlorophyll-meter readings of corn leaves. *J. Plant. Nutr.Soil. Sci*. 175:604-613

[29] TIL, A.R. 2010. Sulphur and sustainable agriculture. First edition, IFA, Paris, France. pp. 70.

[30] TYSKO M.B. AND M.B. RODRÍGUEZ. 2006. Respuesta del doble cultivo trigo/soja a la fertilización azufrada. *Ciencia del Suelo*, 24:139-146

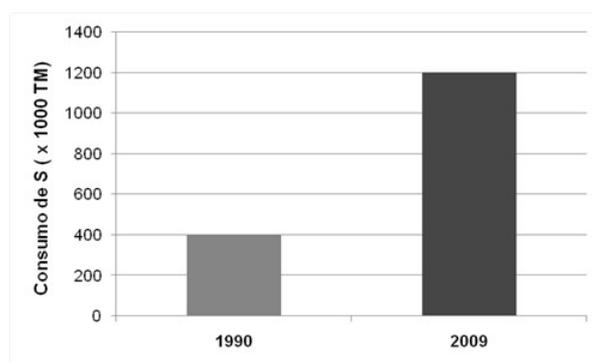
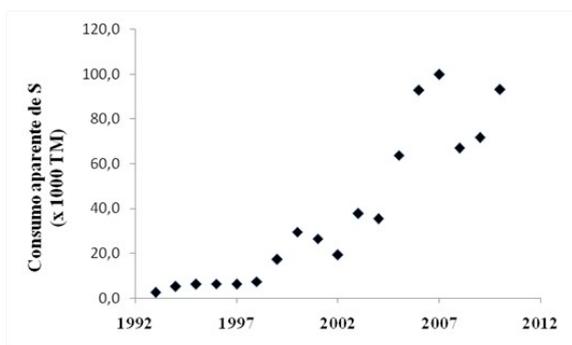
[31] TORRES DUGGAN, M.; M.B. RODRÍGUEZ; R.S. LAVADO Y R. MELGAR. 2010. Eficiencia agronómica del azufre elemental relativa a una fuente azufrada soluble en trigo en la Región Pampeana. *Ciencia del Suelo*, 28: 67-77.

[32] TORRES DUGGAN, M. 2011. Fuentes azufradas en cultivos de grano de la Región Pampeana. Tesis de Maestría en Ciencias del Suelo. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 96 p.

[33] DE MIRANDA, L.N.; CLAESSEN DE MIRANDA, J.C. 2008. Adubacao de Enxofre para a Cultura do Milho sob Plantio Convencional e Directo em Solo de Cerrado. 2008. Comunicado Técnico 143. Embrapa. ISSN 1517-1469. Planaltina, DF. 4p.

[34] PRYSTUPA, P.; M. TORRES DUGGAN; G. FERRARIS. 2012. Fuentes y formas de aplicación de azufre y micronutrientes en la Región Pampeana. En: Fertilización de Cultivos y Pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Capítulo 6. Sección 2. Álvarez, R; P. Prystupa; M. Rodríguez.; C. Álvarez (editores). Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 623 p.

[34] SCHEID LOPES, A., RIBEIRO BASTOS, A.R., DAHER, E. 2007. Uso eficiente de fertilizantes nitrogenados e sulfatados na agricultura brasileira: uma visao do futuro. En: Nitrogenio e Enxifre na Agricultura Brasileira. IPNI-Brasil. 714 p.



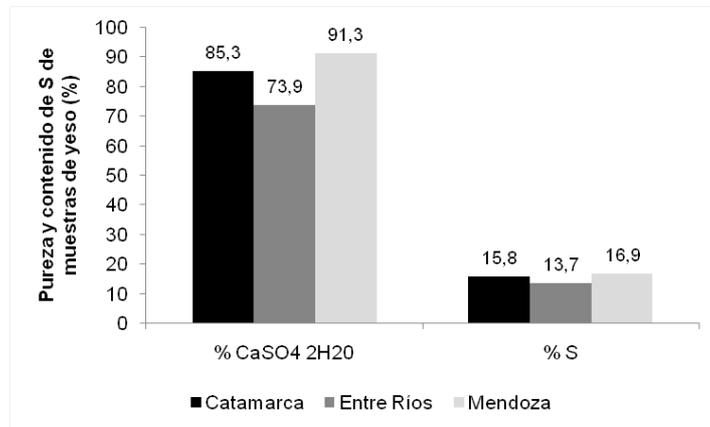
<sup>1</sup> Tecnoagro S.R.L, Tel: (+54) 11 4-553-2474. Buenos Aires, Argentina. Email: [torresduggan@tecnoagro.com.ar](mailto:torresduggan@tecnoagro.com.ar)

<sup>2</sup> Docente regular en la Carrera de Especialización en Fertilidad del suelo y Fertilización, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

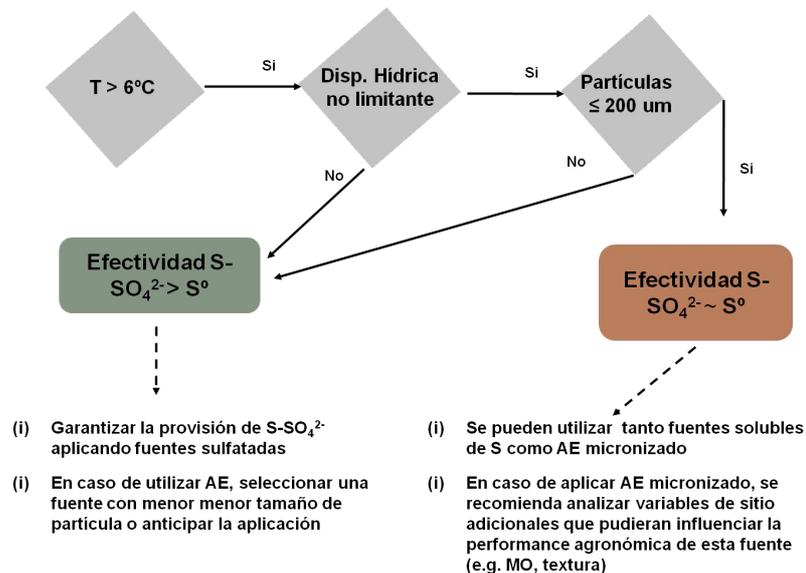
<sup>3</sup> Coordinador de Comisiones Científicas. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS).

<sup>4</sup> Prof. Adjunta, Cátedra Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

**Figura 1.** Evolución del consumo de fertilizantes en la Argentina (izquierda) y Brasil (derecha). Elaboración propia en base a datos provistos por Fertilizar AC (Argentina) y Scheid Lopes et al. [34] (Brasil).



**Figura 2.** Pureza y contenido de S (en %) de muestras de yeso agrícola proveniente de diferentes provincias de la Argentina (Ponce y Torres Duggan, [5]).



**Figura 3.** Modelo conceptual Del funcionamiento de fuentes azufradas en la Región Pampeana argentina (Torres Duggan, inédito).

<sup>1</sup> Tecnoagro S.R.L, Tel: (+54) 11 4-553-2474. Buenos Aires, Argentina. Email: [torresduggan@tecnoagro.com.ar](mailto:torresduggan@tecnoagro.com.ar)

<sup>2</sup> Docente regular en la Carrera de Especialización en Fertilidad del suelo y Fertilización. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires

<sup>3</sup> Coordina

<sup>4</sup> Prof. A