

**PAUTAS PARA EL DIAGNOSTICO DE LA FERTILIDAD
AZUFRADA EN SOJA (*GLYCINE MAX* (L) Merr.)**

Gustavo Nestor Ferraris

Ingeniero Agrónomo. 1995.
Facultad de Ciencias Agrarias
Universidad Nacional de Rosario.

Magister Scientiae – Area: Ciencias del Suelo
Escuela para Graduados de la Facultad de Agronomía
Universidad de Buenos Aires

COMITE CONSEJERO

Consejero principal:

Manuel C. Ferrari
Ingeniero Agrónomo (UBA)
M. Agr. Sc. (University of Reading, Reino Unido)

Consejero:

Flavio H. Gutiérrez Boem
Ingeniero Agrónomo (UBA)
Ph. D. (University of Kentucky, EE.UU.)

JURADO DE TESIS

Presidente:

Manuel C. Ferrari
Ingeniero Agrónomo (UBA)
M. Agr. Sc. (University of Reading, Reino Unido)

Miembro:

Fernando O. García
Ingeniero Agrónomo (UBA)
Ph. D. (Kansas State University, EE.UU.)

Miembro:

Raúl S. Lavado
Ingeniero Agrónomo (UBA)

Fecha de aprobación de la tesis: 3 de Mayo de 2004

Agradecimientos:

A mis padres, Néstor e Hilda, eternamente, por su infinita paciencia e incondicional apoyo.

A mis amigos, por sus consejos y por darme ánimo ante cada dificultad.

A mis consejeros, jurados, y a la directora del programa Ciencias del Suelo, por su inestimable enseñanza.

A Dios, por hacerme una vez más un privilegiado, y a María por su infinita protección durante todo este tiempo.

A la memoria de Cristian se lo dedico. Su presencia desde el Cielo es una luz que guía mi camino.

INDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS.....	xi
INDICE DE FIGURAS.....	xviii
DESCRIPCION DE ESTADIOS FENOLOGICOS DE SOJA (ESCALA DE FEHR AND CAVINESS, 1977) MENCIONADOS EN ESTE TRABAJO....	xxiii
DESCRIPCION DE ELEMENTOS QUIMICOS.....	xxiv
DESCRIPCION DE ABREVIATURAS.....	xxv
RESUMEN.....	xxvii
ABSTRACT.....	i
	xxx
CAPITULO I: Introducción general.....	1
1- El cultivo de Soja <i>Glycine max</i> (L) Merr.....	2
1.a- Presentando a <i>Glycine max</i> (L) Merr.....	2
1.b- Orígenes y expansión de la Soja.....	2
1.c- Perfil nutricional de la Soja y su valor en la alimentación humana y animal. Usos alternativos a la alimentación.....	3
1.d- Importancia de la Soja en la agricultura Argentina.....	5
2- El Azufre como nutriente de los vegetales.....	6
2.a- Funciones del Azufre en los vegetales.....	6
2.b- Síntomas y consecuencias de la insuficiencia de S.....	7
2.c- Causas del agotamiento del S en los suelos.....	8

2.d- Experiencias en fertilización azufrada de Soja y otros cultivos.	10
2.e- Diagnóstico de fertilidad azufrada: Métodos empleados en Argentina y en otras regiones del mundo.....	11
3- Objetivos de la tesis.....	12
4- Hipótesis.....	13
CAPITULO II: Materiales y métodos.....	14
1- Presentación de los experimentos realizados.....	15
2- Diseño experimental y tratamientos evaluados.....	16
3-Amplitud geográfica, agroclimática y productiva de los sitios experimentales.....	17
4- Caracterización y conducción de los experimentos de la red.....	22
5- Evaluación de rendimientos y cálculo de la respuesta a S.....	25
CAPITULO III: Requerimientos de S de la Soja.....	29
1- Introducción.....	30
2- Metodología utilizada.....	31
3- Resultados y discusión.....	33
3.a- Acumulación de materia seca y S en Soja.....	33
3.b- Requerimientos de S de la Soja.....	40
3.c- Curvas de dilución de S en Soja.....	42
4- Conclusiones.....	46
CAPITULO IV: Caracterización de la respuesta a S. Evaluación de los	

análisis de suelo como herramienta de diagnóstico.....	48
1- Introducción.....	49
2- Materiales y métodos.....	52
2.a- Análisis de suelos al momento de la siembra.....	52
2.b- Evaluación de la mineralización de S basada en incubaciones de suelos.....	53
2.c- Análisis estadístico de los datos y cálculo de la respuesta a S.....	55
3- Resultados y discusión.....	57
3.a- Ensayos campaña 2000/01.....	
3.a.1- Resultados generales de la red: Respuesta a la fertilización azufrada en Soja.....	57
3.a.2- Predicción de la respuesta a S en base a variables de manejo.....	62
3.a.3- Predicción de la respuesta a S en base a parámetros de suelo evaluados a la siembra.....	64
3.a.4- Estudios directos de mineralización: incubaciones de suelo.....	74
3.a.5- Valoración de las incubaciones en relación a otras variables de suelo.....	77
3.b- Ensayos campaña 2001/02.....	
3.b.1- Resultados generales de la red: Respuesta a la	82

fertilización azufrada en Soja durante el segundo año de ensayos.....	82
3.b.2- Predicción de la respuesta a S en base a variables de manejo.....	86
3.b.3- Predicción de la respuesta a S en base a parámetros de suelo evaluados a la siembra.....	87
4- Conclusiones.....	93
CAPITULO V: Evaluación de herramientas de diagnóstico: Análisis foliares.....	96
1- Introducción.....	97
2- Materiales y métodos.....	101
2.a- Caracterización de las determinaciones realizadas.....	101
2.b- Metodología de muestreo.....	102
2.c- Análisis estadístico de los datos y cálculo de la respuesta a S...	104
3- Resultados y discusión.....	105
3.a- Análisis químicos foliares.....	124
3.b- Lecturas de clorofila.....	142
4- Conclusiones.....	144
CAPITULO VI: Consideraciones finales sobre el diagnóstico de fertilidad azufrada en Soja.....	145
1- Acerca de la respuesta a S en Soja.....	146

2- Acerca del diagnóstico de fertilidad azufrada en base a variables de suelo y planta.....	152 154
3- Acerca del alcance de los resultados presentados.....	156
4- Acerca del desarrollo futuro de la fertilización azufrada en Soja.....	173
BIBLIOGRAFIA CITADA.....	
ANEXO: Descripción de las metodologías de análisis químicos de S en realizados en suelo y planta.....	

INDICE DE TABLAS

Tabla 1- Localización (partido o departamento y provincia), serie y tipo de suelo del sitio experimental correspondiente a los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS. Campaña 2000/01.....	18
Tabla 2- - Localización (partido o departamento y provincia), serie y tipo de suelo del sitio experimental correspondiente a los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS. Campaña 2001/02.....	20
Tabla 3- Años de agricultura, cultivo antecesor y sistema de labranza de los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS Cono Sur. Campaña 2000/01.....	21
Tabla 4- Años de agricultura, cultivo antecesor y sistema de labranza de los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS Cono Sur. Campaña 2001/02.....	22
Tabla 5- Fecha de siembra y cosecha, variedad y espaciamiento entre surcos utilizados en los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS Cono Sur. Campaña 2000/01.....	24
Tabla 6- Fecha de siembra y cosecha, variedad y espaciamiento entre surcos utilizado en los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS Cono Sur. Campaña 2001/02.....	25

-
- Tabla 7-** Acumulación de materia seca (kg ha^{-1}) en diferentes estadios fenológicos de la Soja. Campaña 1999/00. Valores promedio de cuatro muestras (tres en el estadio V3)..... 33
- Tabla 8-** Acumulación de materia seca (kg ha^{-1}) en diferentes estadios fenológicos de la Soja. Campaña 2001/02. Valores promedio de 33 cuatro muestras..... 33
- Tabla 9-** Concentración de S (%) en órganos vegetativos y reproductivos 35 durante el ciclo de la Soja. Campaña 1999/00. Promedio de cuatro muestras (tres en el estadio V3)..... 35
- Tabla 10-** Concentración de S (%) en órganos vegetativos y reproductivos 35 durante el ciclo de la Soja. Campaña 2001/02. Promedio de cuatro muestras..... 35
- Tabla 11-** Producción de materia seca total y en grano, requerimientos y exportación de S del cultivo de Soja. Los valores corresponden al 41 estado R8, para los cultivares Nidera A 4100 RG (campaña 1999/00) y Don Mario 3800 RR (campaña 2001/02)..... 41
- Tabla 12-** Rendimiento de grano, significancia estadística, coeficiente de variación (C.V.) y respuesta media a la fertilización con S. Ensayos campaña 2000/01. Los rendimientos son promedio de cuatro

repeticiones (tres en Pergamino I-1, Maracó, Catriló I-1, Catriló I-2 y Capital I-1). Respuesta a S $=[(T2-T0) + (T3-T1)]/2$. Para un mismo sitio, los rendimientos seguidos de diferentes letras difieren significativamente (LSD, $\alpha=0,10$).....

Tabla 13- Variables de suelo evaluadas a la siembra con objetivo de diagnóstico de la fertilidad azufrada en Soja de primera. Ensayos campaña 2000/01. Los valores presentados son promedio de las repeticiones de cada ensayo.....

Tabla 14- Modelos de regresión seleccionados para explicar la respuesta a S en Soja de primera. Procedimiento Stepwise ($P=0,10$). Ensayos campaña 2000/01.....

Tabla 15- S-sulfatos inicial, S-sulfatos final y S-sulfatos mineralizados (S-inc) en incubaciones controladas de muestras superficiales (0-20 cm) de suelo. Doce sitios de todo el país, seleccionados por su bajo error experimental, variabilidad textural y respuesta diferencial a la fertilización azufrada. Campaña 2000/01.....

Tabla 16- Coeficiente de determinación y significancia estadística de modelos de regresión lineal de la respuesta a la fertilización azufrada en Soja, en base a distintas variables de suelo, para 11 sitios de bajo error experimental. Campaña 2000/01.....

-
- Tabla 17-** Análisis de multicolinealidad entre diferentes variables de suelo para 11 sitios de bajo error experimental cuyas muestras de suelos fueron incubadas. Campaña 2000/01.....
- Tabla 18-** Rendimiento de grano, significancia estadística, coeficiente de variación (C.V.) y respuesta media a la fertilización con S. Ensayos campaña 2001/02. Los rendimientos son promedio de cuatro repeticiones (tres en Río Segundo y Constitución, dos en Junín II-2). Respuesta a S $=[(T2-T0) + (T3-T1)]/2$. Para un mismo sitio, los rendimientos seguidos de diferentes letras difirieron significativamente (LSD, $a=0,10$)..... 83
- Tabla 19-** Variables de suelo evaluadas a la siembra con objetivo de diagnóstico de la fertilidad azufrada en Soja de primera. Ensayos campaña 2001/02. Los valores presentados son promedio de las repeticiones de cada ensayo..... 92
- Tabla 20-** Precipitaciones registradas en los sitios experimentales durante el período siembra-cosecha. Ensayos campaña 2001/02.....
- Tabla 21-** Concentración foliar de N, S, contenido de S en T0 con relación al tratamiento T2 (IS%S sin P), contenido de S en T1 con relación a T3 (IS%S con P) y relación (N/S) total calculada sobre muestras de la

lámina del folíolo central de la última hoja expandida. La respuesta a S se calculó como: Respuesta a S sin agregado de P (Resp sin P)=Rendimiento T2 - Rendimiento T0; Respuesta a S con agregado de P (Resp con P)= Rendimiento T3 - Rendimiento T1. Muestras tomadas en estado vegetativo (V4-V6) en 13 ensayos de la campaña 2000/01. Las muestras de cada tratamiento fueron compuestas por submuestras provenientes de las 4 repeticiones (30 láminas por repetición).....

Tabla 22- Concentración foliar de N, S, contenido de S en T0 con relación al tratamiento T2 (IS%S sin P), contenido de S en T1 con relación a T3 (IS%S con P) y relación (N/S) total calculada sobre muestras de los tres folíolos de la última hoja expandida. Muestras tomadas en estado reproductivo (R2-R3) en 11 ensayos de la campaña 2000/01. Las muestras de cada tratamiento fueron compuestas por submuestras provenientes de las 4 repeticiones (30 láminas por repetición). Los valores de Respuesta a S correspondientes a cada experimento son presentados en la Tabla 21.....

Tabla 23- Lecturas de clorofila, significancia estadística, índices de suficiencia de S sin P (ISS sin P= Lectura T0/Lectura T2) y con agregado de P (ISS con P= Lectura T1/Lectura T3), y respuesta al agregado de S. La respuesta a S se calculó como: Respuesta a S sin agregado de P (Resp sin P)=Rendimiento T2 - Rendimiento T0; Respuesta a S con

agregado de P (Resp con P)= Rendimiento T3 – Rendimiento T1. Las lecturas fueron realizadas en un estado vegetativo temprano (V4-V5) 125 en 9 ensayos de la campaña 2000/01 ubicados en el norte de Bs As. El valor de cada tratamiento representa el promedio de 4 repeticiones y 15 lecturas por repetición. El análisis estadístico se realizó considerando como valor muestral el promedio de las 15 lecturas.....

Tabla 24- Lecturas de clorofila, significancia estadística, índices de suficiencia de S sin P (ISS sin P= Lectura T0/Lectura T2) y con agregado de P (ISS con P= Lectura T1/Lectura T3), y respuesta al agregado de S. La respuesta a S se calculó como: Respuesta a S sin agregado de P (Resp sin P)=Rendimiento T2 – Rendimiento T0; Respuesta a S con agregado de P (Resp con P)= Rendimiento T3 – Rendimiento T1. Las lecturas fueron realizadas en un estado reproductivo temprano (R2) en 128 11 ensayos de la campaña 2000-01 ubicados en el norte de Bs As. El valor de cada tratamiento representa el promedio de 4 repeticiones y 15 lecturas por repetición. El análisis estadístico se realizó considerando como valor muestral el promedio de las 15 lecturas.....

Tabla 25- Lecturas de clorofila e índices de suficiencia de S sin P (ISS sin P= Lectura T0/Lectura T2) y con agregado de P (ISS con P= Lectura T1/Lectura T3), significancia estadística y respuesta al agregado de S

para los correspondientes ensayos. La respuesta a S fue calculada de la siguiente manera: Respuesta a S sin agregado de P (Resp sin P)= Rendimiento T2 – Rendimiento T0; Respuesta a S con agregado de P (Resp con P)= Rendimiento T3 – Rendimiento T1. Campaña 2001/02.134

Las lecturas fueron realizadas en un estado vegetativo temprano, en cuatro ensayos ubicados en el norte de Bs As. El valor de cada tratamiento representa el promedio de cuatro repeticiones y 15 submuestras por repetición. El análisis estadístico se realizó considerando como valor muestral el promedio de las 15 submuestras..

Tabla 26- Lecturas de clorofila, significancia estadística, índices de suficiencia de S sin P (ISS sin P= Lectura T0/Lectura T2) y con agregado de P (ISS con P= Lectura T1/Lectura T3), y respuesta al agregado de S. La respuesta a S se calculó como: Respuesta a S sin agregado de P (Resp sin P)=Rendimiento T2 – Rendimiento T0; Respuesta a S con136 agregado de P (Resp con P)= Rendimiento T3 – Rendimiento T1. Las lecturas fueron realizadas en un estado reproductivo temprano (R2) en 5 ensayos de la campaña 2001/02 ubicados en el norte de Bs As. El valor de cada tratamiento representa el promedio de 4 repeticiones y 15 lecturas por repetición. El análisis estadístico se realizó considerando como valor muestral el promedio de las 15 lecturas.....

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1-** Acumulación de materia seca total y en diferentes órganos de la planta de Soja. Valores promedio de tres muestras (Estado V3) y cuatro muestras (R2, R5, R7 y R8). Campaña 1999/00..... 37
- Figura 2-** Acumulación de materia seca total y en diferentes órganos de la planta de Soja. Valores promedio de cuatro muestras. Campaña 2001/02..... 37
- Figura 3-** Acumulación de S en planta entera y en diferentes órganos del cultivo de Soja. Valores promedio de tres muestras (Estado V3) y cuatro muestras (R2, R5, R7 y R8). Campaña 1999/00..... 39
- Figura 4-** Acumulación de S en planta entera y en diferentes órganos del cultivo de Soja. Valores promedio de cuatro muestras. Campaña 2001/02..... 39
- Figura 5-** Concentración de S en biomasa aérea en función de la materia seca acumulada. Campañas 1999/00 (triángulos vacíos) y 2001/02 (círculos llenos)..... 43
- Figura 6-** Concentración foliar de S en función de la materia seca acumulada en hojas más pecíolos. Campañas 1999/00 (triángulos vacíos) y 2001/02 (círculos llenos)..... 44
- Figura 7-** Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera sin agregado de P (a) o con agregado de P (b). Ensayos campaña 2000/01. Los

-
- números corresponden a los sitios presentados en la Tabla 1. Las barras grafican la respuesta media y las líneas verticales representan la desviación estándar respecto de la media..... 61
- Figura 8-** Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera en función de los años de agricultura continua desde la última pradera. Ensayos campaña 2000/01. Los datos de la historia agrícola de los sitios fueron suministrados por los propios productores. Se presenta la información proveniente de 22 sitios: se eliminaron del análisis los ensayos Río Cuarto I-1, Maracó y Catrilo I-1 (ver punto 3.a.2), y a estos se le suman los cuatro sitios sin información de años de agricultura (Tabla 3)..... 64
- Figura 9-** Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera en función de parámetros de suelo evaluados a la siembra. Ensayos campaña 2000/01. Los círculos vacíos indican sitios no considerados en el análisis..... 68
- Figura 10-** Relación entre la respuesta al agregado de S y la concentración de S-sulfatos mineralizados por incubaciones de muestras superficiales de suelo (S-inc). Campaña 2000/01. Figura 10.a: incluye el sitio Paraná I-1; Figura 10.b: ajuste luego de retirar del análisis al sitio Paraná I-1..... 75
- Figura 11-** Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera sin

agregado de P (a) o con agregado de P (b). Ensayos campaña 2001/02.

Los números corresponden a los sitios presentados en la Tabla 2. Las barras grafican la respuesta media a S y las líneas verticales 85 representan la desviación estándar respecto de la media.....

Figura 12- - Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera en función de los años de agricultura continua desde la última pradera. Ensayos campaña 2001/02. Los datos de la historia agrícola de los sitios fueron suministrados por los propios productores. Se presenta la información proveniente de 12 sitios: se eliminaron del análisis los ensayos Junín II-2, Tandil II-1 y Uruguay (ver punto 3.b.2), y a estos 87 se le suman los dos sitios sin información de años de agricultura (Tabla 4).....

Figura 13- Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera en función 90 de parámetros de suelo evaluados a la siembra. Ensayos campaña 2001/02.....

Figura 14- Asociación entre la respuesta al agregado de S y la concentración foliar de S en T0 (a), la concentración foliar de S en T1 (b), el IS%S sin agregado de P (c), y el IS%S con agregado de P (d). Muestras de la lámina del folíolo central de la última hoja expandida en un estado 116 vegetativo temprano (V4-V6). IS%S: Índice de suficiencia basado en las concentraciones foliares de S.....

-
- Figura 15-** Asociación entre la respuesta al agregado de S y la concentración foliar de S en T0 (a), la concentración foliar de S en T1 (b), el IS%S sin agregado de P (c), y el IS%S con agregado de P (d). Muestras de los tres folíolos de la última hoja expandida en un estado reproductivo temprano (R2-R3). IS%S:Índice de suficiencia basado en las concentraciones foliares de S..... 120¹¹⁸
- Figura 16-** Relación entre las concentraciones foliares de S en V4 y R2 para los tratamientos T0 (a) y T1 (b).....
- Figura 17-** Asociación entre la respuesta a la aplicación de S y la relación (N/S)total en T0 en el estadio (V4-V6) (a), la relación (N/S)total en T1 en el estadio (V4-V6) (b), la relación (N/S)total en T0 en el estadio (R2-R3) (c), y la relación (N/S)total en T1 en el estadio (R2-R3) (d). Las muestras corresponden a la lámina del folíolo central de la última hoja expandida en V4, y a los tres folíolos de la última hoja expandida en R2..... 122¹²²
- Figura 18-** Asociación entre la respuesta a la fertilización azufrada y el índice de suficiencia de S (ISS) con o sin agregado de P. El ISS corresponde a un estado vegetativo temprano (V4-V5; a y b) o reproductivo (R2; c y d). Ensayos campaña 2000/01..... 132¹³²
- Figura 19-** Asociación entre la respuesta a la fertilización azufrada y el índice de suficiencia de S (ISS) con o sin agregado de P. El ISS corresponde

a los estadíos V4 (a y b) y R2 (c y d). Ensayos campaña 2001/02.....

Figura 20- Asociación entre la concentración de S-sulfatos en el suelo a 0-20 y¹⁴⁷
a 0-60 cm de profundidad. Ensayos campaña 2000/01 (a) y campaña
2001/02 (b).....

DESCRIPCION DE LOS ESTADIOS FENOLOGICOS DEL CULTIVO DE SOJA (ESCALA DE FEHR AND CAVINESS, 1977) MENCIONADOS EN ESTE TRABAJO

V3: Tres hojas completamente expandidas sobre el tallo principal.

V4: Cuatro hojas completamente expandidas sobre el tallo principal.

V5: Cinco hojas completamente expandidas sobre el tallo principal.

V6: Seis hojas completamente expandidas sobre el tallo principal.

R2: Floración plena, corresponde a una flor abierta en uno de los dos nudos superiores del tallo principal con una hoja completamente expandida.

R3: Comienzo de formación de vainas, se presentan vainas de 5 mm de largo en uno de los cuatro nudos superiores del tallo principal con una hoja completamente expandida.

R5: Inicio de formación del grano, se presentan granos de 3 mm de largo en una vaina de uno de los cuatro nudos superiores del tallo principal con una hoja completamente expandida.

R7: Comienzo de madurez, se observa al menos una vaina normal sobre el tallo principal que ha alcanzado su color de madurez.

R8: Madurez completa, el 95 % de las vainas han alcanzado su color de madurez.

DESCRIPCION DE ELEMENTOS QUIMICOS

B: Boro

C: Carbono

Ca: Calcio

Co: Cobalto

Cu: Cobre

Fe: Hierro

K: Potasio

Mg: Magnesio

Mn: Manganeso

Mo: Molibdeno

N: Nitrógeno

Na: Sodio

O: Oxígeno

P: Fósforo

S: Azufre

Zn: Zinc

DESCRIPCION DE ABREVIATURAS

α : probabilidad de cometer error de Tipo I: rechazar la hipótesis nula cuando esta es verdadera

ANOVA: analysis of variance (análisis de la varianza)

Bs As: provincia de Buenos Aires

cm: centímetros

C.V.: coeficiente de variación

dpto.: departamento

DTPA: ácido dietilentriaminopentaacético

ej: ejemplo

g: gramos

ha: hectárea

Hapl. Thapto nátrico: Hapludol Thapto nátrico

IS%S: índice porcentual de suficiencia, basándose en la concentración foliar de S.

Se calcula como el cociente entre el porcentaje de S en el testigo y el porcentaje de S en un tratamiento fertilizado

ISS: índice de suficiencia de S en lecturas de clorofila realizadas con el medidor

Minolta "SPAD 502". Se calcula como el cociente entre la lectura de clorofila en el testigo y la lectura de clorofila en un tratamiento fertilizado

kg: kilogramos

LC: labranza convencional

LM: labranza mínima

LSD: least significant difference (diferencia mínima significativa)

mar.: marzo

mm: milímetros

MO: materia orgánica

mp: muestra perdida

m seca acumulada: materia seca acumulada

m seca en grano: materia seca acumulada en los granos

m seca total: materia seca total

n : número de sitios

nov.: noviembre

$P=$: Probabilidad de encontrar una observación fuera del área de rechazo de la hipótesis nula

pH: logaritmo (base 10) de la concentración de hidrogeniones

ppciones: precipitaciones

ppm: partes por millón

r: coeficiente de correlación lineal

R^2 : coeficiente de determinación lineal

Relación N/S total: cociente entre el porcentaje de N y el porcentaje de S en láminas foliares

res. est.: valor residual estudentizado

S. A. de Areco: San Antonio de Areco

SD: siembra directa

sig. est.: significancia estadística

S inc: S-sulfatos mineralizados por incubaciones de suelo

sin inform: sin información

Soja 1ra: Soja de primera siembra

Soja 2da: Soja de segunda siembra, luego de un cultivo invernal para cosecha

t: tonelada

VRE: Valor residual estudentizado

vs: versus

RESUMEN

La Soja (*Glycine max* (L) Merr.) es el principal cultivo de la Argentina. Sin embargo, los rendimientos de grano obtenidos a campo no han acompañado el incremento en el potencial de los nuevos cultivares. Un ajuste en el manejo de la fertilidad puede ayudar a reducir esta brecha.

En los últimos años, se ha evidenciado que el Azufre (S) es un nutriente con posibilidades de incrementar los rendimientos en Soja, como resultado de la larga historia de exportación de nutrientes sin reposición por fertilización. El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta a la fertilización azufrada en el área sojera argentina, y desarrollar una metodología de diagnóstico que permita predecirla.

Durante dos años se determinaron los requerimientos de S de la Soja, alcanzándose valores de 4,67 y 2,72 kg de S t⁻¹ de grano. En las campañas 2000/01 y 2001/02 se condujeron 29 y 17 experimentos de campo, respectivamente, en el área sojera central. En el 20 % de los ensayos se registraron respuestas positivas a la fertilización, localizándose principalmente en el centro-sur de Santa Fe y, en menor medida, en el centro-norte de Buenos Aires.

Con objetivos de diagnóstico, se evaluaron variables de suelo, de planta, y estudios de mineralización de S (incubaciones de suelo). El modelo aditivo que integró las variables MO/arcilla y S-sulfatos (0-60 cm) evaluados a la siembra logró explicar satisfactoriamente la respuesta en toda la red y en un grupo de ensayos de bajo error experimental. Los análisis de planta, de acuerdo con su practicidad y valor predictivo, se posicionarían como herramientas de monitoreo y

corrección de la estrategia de fertilización. Las incubaciones de suelo constituyen una herramienta promisoría que debería seguirse estudiando.

Palabras claves: Glycine max (L) Merr., fertilización, Azufre, requerimientos, respuesta, diagnóstico, análisis de suelo, análisis de planta, incubaciones de suelo.

ABSTRACT

Soybean (*Glycine max* (L) Merr.) cropped area has been growing during the last decades and now it has become the main grain crop in Argentina. Soybean grain and its products are the most important export goods of the country. However, field yields are far from the yield potential of the cultivars used. A better nutritional management may help to reduce this difference.

Sulfur deficiencies in soybean fields have been reported in some zones of the pampas during the last years, specially in soils with a long cropping history. The objective of this study was to evaluate the effect of the sulfur fertilization on soybean yields along the pampas and to develop a diagnosis and recommendation system for sulfur fertilization of soybean crops.

Sulfur requirements were established between 4,67 and 2,72 kg of S per ton of grain. In 2000/01 and 2001/02 field experiments were carried out in the central soybean area, and were found that in 20% of the experimental sites soybean responded to sulfur fertilization. Yield increases due to sulfur fertilization was more frequently observed in the south of the Santa Fe province, and in the north of the Buenos Aires province.

Soil, plant and mineralization tests were evaluated as diagnostic tools. An additive model based on some soil characteristics (organic matter / clay content ratio and sulfate concentration 0-60 cm) was the best way to explain yield response to sulfur fertilization. Plant analysis determinations appeared to be adequate tools only for monitoring the nutritional status of the crop. Sulfur

mineralization index was not a better predictor than other soil characteristics. However, this diagnosis method deserves further study in the future.

Even though more information is necessary to elaborate a consistent method to predict soybean response to sulfur fertilization, this work has identified the main soil variables related to this response, and the main areas within the pampas where sulfur deficiency frequently occur.

Key words: Glycine max (L) Merr., fertilization, Sulfur, requirements, response, diagnosis, soil test, plant analysis, sulfur mineralization index.

CAPITULO I

INTRODUCCION GENERAL

1- EL CULTIVO DE SOJA *GLYCINE MAX* (L) MERR.**1.a- PRESENTANDO A *GLYCINE MAX* (L) MERR.**

La Soja (*Glycine max* (L) Merr.) pertenece a la familia de las Leguminosas (Fabaceae), y dentro de ella a la subfamilia de las Papilionoideas. El nombre *Glycine* deriva del vocablo griego “glykys” (dulce), y probablemente se refiere al sabor dulce de los tubérculos de una planta clasificada erróneamente como *Glycine apios* L. El uso de este vocablo como nombre genérico quedó injustificado a partir de la reclasificación de esta especie como *Apios americana* Medik. Sin embargo, para no alterar la denominación de una especie de gran difusión e importancia económica, se mantuvo su utilización para designar al género que incluye a la Soja y otras especies emparentadas (Hymowitz y Singh, 1987).

1.b- ORÍGENES Y EXPANSIÓN DE LA SOJA

La Soja es una especie originaria del norte y centro de China, donde fue introducida al cultivo probablemente en el siglo XI AC. En 1740 se plantó por primera vez en Europa (en el Jardín des Plantes). En América fue introducida a Georgia (EE.UU.) en 1765, y posteriormente a Illinois (EE.UU.) en 1851, desde donde se diseminó. En el año 1862 se realizaron las primeras plantaciones de Soja en Argentina, y en 1882 en Brasil (Giorda, 1997). En nuestro país, los primeros ensayos con el cultivo se realizaron entre 1909 y 1910, en distintas escuelas agrícolas y estaciones experimentales (Pascale, 1989). Luego de tres intentos fallidos de introducir la siembra de esta especie con fines comerciales (en 1919, 1935 y 1941-43), en 1956 la iniciativa prosperó (Giorda, 1997). Entre 1956 y

1960 se realizaron en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Pergamino los primeros estudios acerca del comportamiento varietal, y de prácticas de manejo y labranza. Las primeras investigaciones sobre Soja en la Universidad de Buenos Aires (UBA) se desarrollaron entre 1958 y 1963, y consistieron en ensayos de variedades y en la determinación de los requerimientos bioclimáticos del cultivo en cuanto a temperatura, fotoperíodo y humedad (Pascale, 1969). En 1962 se realizó la primera exportación de Soja, mediante un embarque de 6000 t con destino a Hamburgo (Alemania).

Con la fijación de un *precio mínimo oficial* y la compra garantizada al productor en 1965, y del *precio sostén* en 1966, la siembra de Soja se generalizó (Porzio, 1970), siguiendo un proceso de expansión creciente que aún hoy continúa. La aparición de variedades transgénicas resistentes a Glifosato en la campaña 1996/97 marcó un nuevo impulso a la difusión de la Soja, al bajar los costos de producción y, asociadas a la siembra directa, permitir su implantación en áreas hasta entonces marginales para la agricultura.

1.c- PERFIL NUTRICIONAL DE LA SOJA Y SU VALOR EN LA ALIMENTACIÓN HUMANA Y ANIMAL. USOS ALTERNATIVOS A LA ALIMENTACIÓN

La Soja tiene un amplio uso en alimentación humana y animal. Para los asiáticos los alimentos en base a Soja son cotidianos, en cambio en Occidente son más ocasionales y a veces difíciles de aceptar (Golbitz, 1993). Su consumo puede ayudar a paliar problemas nutricionales como la incidencia de enfermedades cardíacas asociadas al excesivo consumo de carne, o la desnutrición tan extendida

en países subdesarrollados. La Soja puede ingerirse como vegetal verde y fresco, porotos secos, harina, aceite, imitaciones de carne, leche, quesos, pastas y salsas.

Por otra parte, el poroto de Soja es el grano oleaginoso utilizado en alimentación con mayor cantidad (40 %) y mejor calidad de proteínas. Estas, pertenecientes al grupo de las caseínas, no producen ácido úrico en la digestión (Kopsic, citado por Cuniberti, 1997). Las proteínas de Soja contienen todos los aminoácidos esenciales para los seres humanos, y hay numerosos productos comerciales elaborados a partir de ellas (Cuniberti, 1997).

Respecto del aceite, la Soja es rica en ácidos grasos esenciales, y el mismo es considerado entre los mejores para la alimentación humana (Cuniberti, 1997). Contiene una elevada proporción de ácidos grasos insaturados, deseables desde el punto de vista de la nutrición. Sin embargo, en nuestro país su ingesta se restringe a pequeñas proporciones en mezclas con los de otros vegetales, siendo postergado por el de girasol.

El poroto de Soja presenta un tenor de carbohidratos inferior al de los cereales o la papa, y es apto para la alimentación de celíacos y diabéticos ya que su contenido de almidón no supera el 3 % (Kopsic, citado por Cuniberti, 1997). Además, el grano de Soja es una fuente importante de vitaminas y minerales. Se destacan las vitaminas A, B, D y E en el poroto seco, y la C en el grano verde. Entre los minerales, el Calcio (Ca), Fósforo (P), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) son abundantes pero están poco disponibles por la presencia de ácido fítico y el efecto inhibitorio de las proteínas de Soja sobre los dos últimos (Cuniberti, 1997).

Para la alimentación animal, el grano de Soja reúne la condición de ser rico en energía y en proteínas de elevada calidad. Sin embargo, debe ser desactivado total o parcialmente antes de utilizarse en la alimentación de monogástricos, por la presencia de factores antinutricionales que afectan la eficiencia de conversión hasta en un 40 % (Azcona y Shang, 1997). La Soja constituye un suplemento muy ventajoso frente a los problemas sanitarios generados por la utilización de proteínas de carne en la dieta animal.

Finalmente, el desarrollo de biocombustibles a partir de aceites vegetales puede constituir un destino alternativo que contribuya a mantener una elevada demanda del grano de Soja y absorba los continuos aumentos en la producción de esta oleaginosa.

1.d- IMPORTANCIA DE LA SOJA EN LA AGRICULTURA ARGENTINA

La Soja es el principal cultivo en nuestro país. En la campaña 2002/03 el área sembrada alcanzó a 12,5 millones ha y la producción a 36 millones t. A su vez, Argentina es el primer exportador mundial de aceite de Soja (52 % del mercado mundial), y el segundo exportador mundial de harina de Soja (45 % del mercado mundial) (Fuente: Grupo de Estudios Económicos y Sociales, EEA INTA Pergamino). El complejo sojero contribuye con el 25 % de las exportaciones totales, y es desde hace más de una década el principal conjunto exportador de nuestro país (Fuente: Grupo de Estudios Económicos y Sociales, EEA INTA Pergamino). Sin embargo, a pesar de la extraordinaria difusión del cultivo, los rendimientos medios a escala nacional (2800 kg ha^{-1} ; campaña 2002/03) (Fuente: USDA) distan de los potenciales (más de 6000 kg ha^{-1}) y de los

obtenidos por los mejores productores (4000 - 4500 kg ha⁻¹). Por otra parte, los rendimientos en los lotes de producción comercial no han aumentado al mismo ritmo que el progreso genético alcanzado con la continua renovación de cultivares (G. Bartolomé, comunicación personal). Esto es atribuido principalmente a cuestiones de manejo (G. Bartolomé, comunicación personal). En este sentido, el ajuste de la fertilización puede contribuir sustancialmente a que las nuevas variedades expresen su potencial genético en condiciones de gran cultivo. Del mismo modo, el mayor requerimiento de competitividad que se verifica en el ámbito internacional obliga a los productores a hacer un manejo eficiente de los insumos, y en el plano de los fertilizantes refuerza la necesidad de ajustar dosis y formas de aplicación. El cultivo de Soja requiere grandes cantidades de nutrientes para su crecimiento, siendo Nitrógeno (N) el principal en orden de magnitud, seguido por Potasio (K), P, Ca y Azufre (S).

2- EL AZUFRE COMO NUTRIENTE DE LOS VEGETALES

2.a- FUNCIONES DEL AZUFRE EN LOS VEGETALES

El S cumple en los vegetales funciones estructurales y metabólicas (Duke y Reisenauer., 1986; Thompson et al., 1986; Tisdale et al., 1993; Marschner, 1995). La principal función estructural es la de formar puentes disulfuro entre cadenas de polipéptidos, lo cual estabiliza y determina la configuración (estructura terciaria) de las proteínas. Estos puentes confieren a las células resistencia a la deshidratación y las protegen de daños por frío (Levitt, citado por Marschner, 1995). Entre las funciones metabólicas, el S es necesario para la síntesis de coenzima A (involucrada en la formación de ácidos grasos y aminoácidos, y en el

ciclo de los ácidos tricarboxílicos), biotina, tiamina y glutathión (Schiff, 1983; Schmidt y Jäger, 1992). También forma parte de componentes como sulfolípidos y ferredoxina (Schiff, 1983; Schmidt y Jäger, 1992), la cual participa en la reducción de nitritos y sulfatos, y en la fijación simbiótica de N en los nódulos de las leguminosas. Por otro lado el S, sin formar parte de ella, es necesario para la síntesis de clorofila (Burke et al., 1986; Dietz, 1989) y favorece la formación de aceite en las oleaginosas (Thompson et al., 1986). El grupo thiol, uno de los compuestos orgánicos azufrados más abundantes, integra la molécula de glutathión, un tripéptido con gran poder antioxidante (Cakmak y Marschner, 1992), y que constituye una forma de reserva del S orgánico reducido en las células (Schütz et al., 1991). También interviene en mecanismos de detoxificación de xenobióticos (ej: atrazina) y es precursor de sustancias que acomplejan metales pesados en las plantas, las fitoquelatinas (Grill et al., 1987; Rauser, 1990). Por último, el S forma compuestos que intervienen en el metabolismo secundario, como aleínas (género *Allium*) y glucosinolatos (Crucíferas) (Schnug, 1990, 1993).

2.b- SÍNTOMAS Y CONSECUENCIAS DE LA INSUFICIENCIA DE S

Las deficiencias de S causan disminución en los rendimientos y en la calidad de los granos por reducción de su contenido proteico (Schnug, 1990, 1991). A su vez, analizando el valor biológico de las proteínas sintetizadas, la calidad de éstas se reduce ya que disminuye el tenor de aminoácidos azufrados (Schnug, 1990; Haneklaus et al., 1992; Haneklaus y Schnug, 1992), algunos de los cuales (metionina y cisteína) son esenciales para la alimentación del hombre y los animales de interés agropecuario (Hymowitz, 1985). Paralelamente, se

produce la acumulación de N debido a la marcada inhibición de la síntesis proteica (Freney et al., 1978; Karmoker et al., 1991), fenómeno que es aprovechado para diagnosticar carencias a través del cálculo de la relación N/S (Spencer y Freney, 1980; Nuttall, 1985; Jones, 1986). En plantas deficientes en S el crecimiento se reduce, las hojas presentan un menor tamaño y los tallos son más angostos (Burke et al., 1986). También se produce una clorosis foliar manifiesta causada por la disminución en la síntesis de clorofila (Burke et al., 1986; Dietz, 1989), que comienza a observarse, a diferencia de las deficiencias de N, en las hojas más jóvenes, debido a la lenta translocación del S en la planta (Freney et al., 1978). La senescencia foliar se acelera, y se reduce la nodulación en las leguminosas. La reducción de la actividad fijadora es más pronunciada que la depresión en la fotosíntesis (De Boer y Duke, 1982); por lo tanto, en las leguminosas los síntomas visuales de carencias de S suelen ser indistinguibles de los de N (Anderson y Spencer, 1950). La gran sensibilidad a la falta de S se presenta a nivel de la Nitrogenasa, y no del Rhizobium (O'Hara et al., 1987).

Otras consecuencias fisiológicas de la falta de S son una reducción de la relación tallo/raíz (Edelbauer, 1980), y la disminución de la conductividad hidráulica de raíces, la apertura estomática y la fotosíntesis neta (Karmoker et al., 1991).

2.c- CAUSAS DEL AGOTAMIENTO DEL S EN LOS SUELOS

En los últimos años, el Azufre (S) ha surgido como un nutriente con elevada expectativa de respuesta en rendimiento en las principales zonas de cultivo de Soja de la Argentina. La larga tradición agrícola con laboreo excesivo

de los suelos, la quema de rastrojos, y la secuencia continua de cultivos sin rotaciones con praderas (y aún sin rotación con cultivos de gramíneas) han disminuido progresivamente el contenido de materia orgánica en los suelos. Esto repercutió en forma directa en la disponibilidad de S, ya que la fracción orgánica representa el 95 % del contenido total del nutriente en el suelo (Ericksen, 1997 *a*). En este sentido, Andriulo et al., (1996) estimaron una pérdida de 6,5 kg S ha⁻¹ año⁻¹ en 80 años de agricultura. Sumado a ésto, los altos rendimientos obtenidos en los cultivos de cosecha durante los últimos años, con aplicación de Nitrógeno (N) y P pero sin agregado de S, han intensificado la extracción. Otros autores estiman una exportación media, con los actuales niveles de rendimiento, de 10 kg S ha⁻¹ año⁻¹ (Martínez y Cordone, 2000). Cabe mencionar, por otra parte, que mientras la relación C/N se estabiliza luego de un cierto tiempo de agricultura continua, las reservas de S pueden seguir disminuyendo, manteniendo cierta provisión a los cultivos. Esto puede llevar a un agotamiento muy pronunciado del S del suelo (McLaren y Swift, 1977).

Por otra parte, las vías naturales de reposición son despreciables en zonas alejadas del mar (Till y Blair, 2002), en cultivos de secano (Beaton y Soper, 1986), o donde las emisiones de S de la industria hacia la atmósfera son poco significativas (Hoeft y Fox, 1986, Ericksen et al., 1998), situación que acontece en la región pampeana argentina. Las excretas animales y el S contenido en el agua del suelo (por ej: en el agua proveniente de las napas freáticas) son otras vías de aporte de S (Ericksen et al., 1998), sin embargo, esta situación no es demasiado

frecuente en la zona sojera argentina, exceptuando períodos aislados de excesos hídricos.

2.d- EXPERIENCIAS EN FERTILIZACIÓN AZUFRADA DE SOJA Y OTROS CULTIVOS

Diversos autores han reportado incrementos en los rendimientos por la aplicación de S en Soja de primera en el centro-sur de Santa Fe (Martínez y Cordone, 1998, 2000), centro-norte de Bs. As. (Gutiérrez Boem et al., 1999, 2000; Scheiner et al., 1999 *a*) o en ambas regiones (Melgar y Gearhart, 2000), así como por la aplicación conjunta de S + P y S + N en este cultivo (Martínez y Cordone, 1998). También se ha registrado respuesta a la fertilización azufrada en Soja de segunda, tanto por la aplicación directa al cultivo como por efectos residuales del S aplicado en Trigo (Martínez y Cordone, 1998; Martínez et al., 1999; Gerster y Salvagiotti, 2002). Adicionalmente, se han observado respuestas a la aplicación de S en Maíz (Ferrari et al., 1999 *a*; Martínez y Cordone, 1999), en Trigo (Martínez y Cordone, 1998; Martínez et al., 1999) y Colza (Rubio et al., 1996). Sin embargo, en otras investigaciones no se verificaron aumentos en los rendimientos por la aplicación de S en Soja (Caviglia et al., 1999; Ferraris et al., 2001 *a*; 2001 *b*). En relación con las experiencias de fertilización, cabe destacar que el precio del grano de Soja tradicionalmente ha mantenido una interesante relación insumo/producto con respecto al de los fertilizantes; por lo tanto, aún con niveles no demasiado elevados de respuesta la práctica puede ser económicamente rentable.

2.e- DIAGNÓSTICO DE FERTILIDAD AZUFRADA: MÉTODOS EMPLEADOS EN ARGENTINA Y EN OTRAS REGIONES DEL MUNDO

No obstante haberse observado deficiencias de S en la región pampeana, aún no se cuenta con un método de diagnóstico en el cual basar las recomendaciones de fertilización. En el centro-sur de Santa Fe (más precisamente en el área de influencia de la localidad de Casilda) se concluyó que las respuestas a S ocurren en especial en suelos con larga historia agrícola bajo labranza convencional y monocultivo de Soja, escaso contenido de materia orgánica (MO) y sometidos a procesos de erosión hídrica (Martínez y Cordone, 1998). Sin embargo, en ambientes similares de otras regiones de cultivo no se registraron respuestas positivas a la fertilización (Ferraris et al., 2001 *a*), y sí se observaron respuestas en sitios que no presentaban estas características (Gutiérrez Boem et al., 2000). En algunas áreas de nuestro país, como en el centro-norte de Buenos Aires, sur de Santa Fe y sudeste de Córdoba, las recomendaciones de fertilización con frecuencia se efectúan basándose en una identificación de "ambientes de baja o alta expectativa de respuesta" (Martínez y Cordone, 1998, 2000; Martínez et al., 1999). Otros métodos más específicos han sido evaluados en experimentos aislados, sin un número de sitios suficiente como para abarcar ambientes diferenciales de respuesta ni tampoco probar la estabilidad geográfica e interanual de los criterios bajo estudio. En este sentido, cabe mencionar la determinación a la siembra de la concentración de S-Sulfatos en suelo, evaluada a diferentes profundidades, y el contenido de MO en capa superficial de suelo (0-20 cm) (Martínez y Cordone, 1998; Gutiérrez Boem et al., 2000; Ferraris et al., 2001 *a*).

Otra medición efectuada en nuestro país es la concentración de S en hojas pertenecientes a plantas que se encuentran en un estado vegetativo temprano (Martínez y Cordone, 1998; Ferraris et al., 2001 *a*). Entre los criterios utilizados en otras regiones del mundo, pueden mencionarse la textura del suelo (Johnson, 1987), la aplicación de una dosis proporcional a la escogida para N (Johnson y Fixen, 1990), un índice que incluye la estimación del S mineralizado en el suelo (Ghani, 1994), así como las relaciones entre nutrientes en hoja (Agrawal y Mishra, 1994) y la concentración de S en planta entera (Schnug y Haneklaus, 1998).

Los métodos evaluados con fines de diagnóstico en esta tesis se describen en capítulos posteriores, como también los antecedentes que condujeron a su elección. El **Capítulo IV** trata el estudio del diagnóstico de S basado en los análisis de suelo, mientras que el **Capítulo V** se basa en los análisis foliares y su valoración como criterios de recomendación.

En la mayor parte de los ensayos sobre fertilización en Soja se ha evaluado la respuesta del cultivo a mezclas fertilizantes compuestas por dos o más nutrientes, o se han comparando diferentes productos comerciales, sin detenerse en el estudio de un nutriente en particular. En este trabajo se plantea explorar la respuesta de la Soja a la aplicación de S en las condiciones agroecológicas de la pradera pampeana y evaluar indicadores que permitan predecirla.

3- OBJETIVOS DE LA TESIS

- ♦ Valorar la utilidad de diferentes indicadores de suelo y de cultivo para predecir la respuesta de la Soja a la fertilización con S.

-
- ♦ Evaluar el comportamiento de estos indicadores y la potencialidad de respuesta de la Soja a la fertilización azufrada a través de diferentes condiciones de clima y suelo.
 - ♦ Establecer umbrales críticos para aquellos métodos que demuestren ser más eficientes en predecir la respuesta a la fertilización y lo suficientemente prácticos como para ser utilizados como herramienta de diagnóstico en cultivos extensivos.

4- HIPÓTESIS

- ♦ La respuesta de la Soja a la fertilización azufrada puede predecirse adecuadamente a través de indicadores de suelo y de cultivo.
- ♦ El comportamiento de la Soja al agregado de S y el valor predictivo de las herramientas de diagnóstico evaluadas varía entre las diferentes regiones sojeras.

CAPITULO II

MATERIALES Y METODOS

1- PRESENTACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

Durante la campaña 1999/00 se realizaron los experimentos preliminares que permitieron explorar el potencial de respuesta de la Soja al S en el área de influencia de la EEA Pergamino, y hacer una evaluación inicial de los indicadores de respuesta medidos en el suelo y el cultivo (Ferraris et al., 2001 *a*). En ese mismo ciclo se elaboró la curva de absorción de S a lo largo de la estación de crecimiento, y se determinaron los requerimientos del cultivo y la exportación del nutriente con los granos cosechados, tal como se detalla en el **Capítulo III**. Estas últimas evaluaciones se repitieron durante la campaña 2001/02, y en ambos casos se realizó sobre una parcela fertilizada con S y especialmente instalada con este propósito.

En el ciclo agrícola 2000/01 se realizaron los experimentos destinados a evaluar la utilidad de diferentes indicadores de suelo y de planta para predecir la respuesta de la Soja de primera siembra a la fertilización azufrada. Con el mismo fin, durante la campaña 2001/02 se condujeron ensayos adicionales, aunque en un menor número de sitios. Todos estos experimentos integraron una red de ensayos de fertilización, con la participación del INTA (a través de varias de sus Estaciones Experimentales y Unidades de Extensión) y la Facultad de Agronomía de la UBA (Cátedra de Fertilidad y fertilizantes) en la conducción de los ensayos, y del INPOFOS-Cono Sur y el Proyecto Fertilizar del INTA en la tarea de coordinación. Los datos que integran esta evaluación de métodos de diagnóstico fueron obtenidos de 29 experimentos conducidos en el ciclo 2000/01 (de los cuales el grupo de trabajo del tesista condujo dos) y de otros 17 experimentos

realizados en la campaña 2001/02 (el grupo de trabajo del tesista condujo uno), en el cultivo de Soja de primera. El análisis de la respuesta de la Soja a la fertilización azufrada dentro de esta red, y el estudio de diversas herramientas de diagnóstico basándose en la correlación de dicha respuesta con indicadores de suelo y de cultivo, constituyen el cuerpo central de esta tesis.

2- DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS EVALUADOS

En todos los experimentos de la red se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados, con 2, 3 ó 4 repeticiones (en 1, 7 y 38 de los experimentos realizados, respectivamente). El tamaño de la unidad experimental varió según la localidad, y fue del ancho de una o dos pasadas de la sembradora utilizada para implantar el correspondiente ensayo por 20-50 m de largo, con excepción de una localidad donde el largo de la parcela fue de 200 m.

Los tratamientos evaluados durante el primer año fueron los siguientes:

T0: Testigo absoluto, sin fertilización

T1: P (20 kg P ha⁻¹)

T2: S (15 kg S ha⁻¹)

T3: P + S (20 kg P ha⁻¹ + 15 kg S ha⁻¹)

T4: P + S + K + Magnesio (Mg) + Micronutrientes (20 kg P ha⁻¹ + 15 kg S ha⁻¹ + 14 kg K ha⁻¹ + 12 kg Mg ha⁻¹ + 2 kg Zn ha⁻¹ + 1 kg Cobre (Cu) ha⁻¹ + 1 kg Boro (B) ha⁻¹).

Durante el segundo año de ensayos el tratamiento 4 (T4) difirió levemente, ya que entre los micronutrientes no se incluyó al Cu. Los restantes tratamientos permanecieron idénticos a los estudiados en el primer año.

Las fuentes fertilizantes utilizadas fueron las mismas en todos los ensayos: Superfosfato triple de calcio (0-20-0) para el tratamiento T1, Sulfato de amonio (21-0-0-24 S) en T2 y una mezcla física de las dos anteriores en T3. Para el tratamiento T4 se utilizó Superfosfato triple de calcio (0-46-0), Sulpomag (0-0-19-11Mg-22S), Zincogran (30% Zn), Borogran (10% B) y Oxisulfato de Cobre (20% Cu), este último solamente en la campaña 2000/01.

A través de este esquema se pretendió contrastar la aplicación de S con el testigo absoluto sin agregado de P (T2 vs T0) y con requerimientos cubiertos de P (T3 vs T1). El tratamiento que recibió todos los nutrientes (T4) no reviste importancia para los objetivos centrales de esta tesis.

3- AMPLITUD GEOGRÁFICA, AGROCLIMÁTICA Y PRODUCTIVA DE LOS SITIOS EXPERIMENTALES

La red abarcó 29 ensayos de campo durante la campaña 2000/01, distribuidos en la mayor parte del área sojera argentina. En la campaña 2001/02, se realizaron nuevos experimentos en 17 localidades, con el objetivo de verificar las tendencias observadas en el primer año. De esta manera, se intentó cubrir una variedad de condiciones texturales, de calidad de suelos y de potenciales de producción, como así también de la variabilidad climática que pudiera manifestarse en las regiones abarcadas por la red en dos años consecutivos.

La ubicación de los ensayos y la clasificación de los suelos correspondientes a cada sitio experimental se detallan en las Tablas 1 y 2. Los datos de las series y tipos de suelo fueron tomados de las respectivas cartas de

suelo elaboradas por INTA, a excepción de los ensayos Rivadavia y Trenque Lauquen, cuyos suelos fueron clasificados por el laboratorio Tecnoagro.

Tabla 1- Localización (partido o departamento y provincia), serie y tipo de suelo del sitio experimental correspondiente a los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS. Campaña 2000/01.

Partido/ Departamento	Provincia	Serie de Suelos	Tipo de Suelos (subgrupo)
1. San Jerónimo I-1	Santa Fe	Clason	Argiudol típico
2. Las Colonias	Santa Fe	Esperanza	Argiudol típico
3. Belgrano I-1	Santa Fe	Los Cardos	Argiudol típico
4. Paraná I-1	Entre Ríos	(no informado)	(no informado)
5. Paraná I-2	Entre Ríos	Los Capones	Pelludert argílico
6. Río Cuarto I-1	Córdoba	Olaeta	Haplustol údico
7. Marcos Juárez I-1	Córdoba	Marcos Juárez	Argiudol típico
8. Marcos Juárez I-2	Córdoba	Marcos Juárez	Argiudol típico
9. Iriondo	Santa Fe	Marcos Juárez	Argiudol típico
10. Caseros	Santa Fe	Casilda (fase moderadamente ondulada y severamente erosionada)	Argiudol típico
11. General López	Santa Fe	Hughes	Argiudol típico
12. Colón I-1	Bs As	Rojas	Argiudol típico
13. Pergamino I-1	Bs As	Pergamino	Argiudol típico
14. Pergamino I-2	Bs As	Pergamino (fase moderadamente. erosionada)	Argiudol típico
15. S. A. de Areco I-1	Bs As	Capitán Sarmiento	Argiudol típico
16. S. A. de Areco I-2	Bs As	Capitán Sarmiento	Argiudol típico
17. Rojas	Bs As	Rojas	Argiudol típico
18. Junín I-1	Bs As	Junín	Hapludol típico
19. Junín I-2	Bs As	O'Higgins	Argiudol típico
20. 9 de Julio I-1	Bs As	Norumbega	Hapludol éntico
21. 9 de Julio I-2	Bs As	La Albina	Hapl. Thapto nátrico
22. Tandil I-1	Bs As	Tandil	Argiudol típico
23. Tandil I-2	Bs As	Tandil	Argiudol típico
24. Rivadavia	Bs As	América	Hapludol éntico
25. Trenque Lauquen	Bs As	América	Hapludol éntico
26. Maracó	La Pampa	(no detallado)	Haplustol éntico

(continúa...)

Tabla 1- (continuación)

Partido/ Departamento	Provincia	Serie de Suelos	Tipo de Suelos (subgrupo)
27. Catriló I-1	La Pampa	(no detallado)	Haplustol éntico
28. Catriló I-2	La Pampa	(no detallado)	Haplustol éntico
29. Capital I-1	La Pampa	(no detallado)	Haplustol éntico

Los números romanos indican el año en que se realizó el ensayo, para aquellas localidades donde se implantó más de un experimento.(I: campaña 2000/01). El número arábigo representa la numeración del ensayo dentro de la localidad.

(no detallado): Significa que los suelos no han sido relevados a ese nivel de detalle.

Tabla 2- Localización (partido o departamento y provincia), serie y tipo de suelo del sitio experimental correspondiente a los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS. Campaña 2001/02.

Partido/ Departamento	Provincia	Serie de Suelos	Tipo de Suelos
30. Tercero Arriba	Córdoba	(no detallado)	Molisol
31. Río Segundo	Córdoba	(no detallado)	Entisol
32. San Jerónimo II-1	Santa Fe	Clason	Argiudol típico
33. Belgrano II-1	Santa Fe	Armstrong	Argiudol típico
34. Paraná II-1	Entre Ríos	Los Capones	Pelludert argílico
35. Uruguay	Entre Ríos	Don Guillermo	Pelludert argílico
36. Marcos Juárez II-1	Córdoba	Marcos Juárez	Argiudol típico
37. Río Cuarto II-1	Córdoba	(no detallado)	Haplustol údico
38. Constitución	Santa Fe	Pergamino	Argiudol típico
39. Colón II-1	Bs As	Rojas	Argiudol típico
40. S. A. de Areco II-1	Bs As	Capitán Sarmiento	Argiudol típico
41. Junín II-1	Bs As	Junín	Hapludol típico
42. Junín II-2	Bs As	Junín	Hapludol típico
43. 9 de Julio II-1	Bs As	Norumbega	Hapludol éntico
44. General Pinto	Bs As	Lincoln	Hapludol típico
45. Tandil II-1	Bs As	Tandil	Argiudol típico
46. Capital II-1	La Pampa	(no detallado)	Haplustol éntico

Los números romanos indican el año en que se realizó el ensayo, para aquellas localidades donde se implantó más de un experimento.(II: campaña 2001/02). El número arábigo representa la numeración del ensayo dentro de la localidad.

(no detallado): Significa que los suelos no han sido relevados a ese nivel de detalle.

A la diversidad geográfica, se sumó la amplia gama de cultivos antecesores, años de agricultura continua y sistemas de labranza que caracterizaron a los sitios experimentales incluidos en la red. Esta información se detalla en las Tablas 3 (campaña 2000/01) y 4 (campaña 2001/02).

Tabla 3- Años de agricultura, cultivo antecesor y sistema de labranza de los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS Cono Sur. Campaña 2000/01.

Partido/ Departamento	Años de Agricultura	Cultivo Antecesor	Sistema de Labranza
1. San Jerónimo I-1	40	Soja	SD
2. Las Colonias	16	Maíz	SD
3. Belgrano I-1	> 20	Soja Ira	SD
4. Paraná I-1	(sin información)	Soja Ira	SD
5. Paraná I-2	(sin información)	Trigo/Soja	SD
6. Río Cuarto I-1	> 10	Verdeo Invernal	LC
7. Marcos Juárez I-1	> 11	Maíz	SD
8. Marcos Juárez I-2	> 12	Soja	SD
9. Iriondo	15	Maíz	SD
10. Caseros	> 20	Soja Ira	SD
11. General López	> 30	Avena	SD
12. Colón I-1	10	Arveja	SD
13. Pergamino I-1	5	Maíz	LC
14. Pergamino I-2	5	Sorgo	SD
15. S. A. de Areco I-1	30	Maíz	LC
16. S. A. de Areco I-2	< 5	Maíz	SD
17. Rojas	6	Maíz	SD
18. Junín I-1	> 20	Maíz	LC
19. Junín I-2	> 10	Soja	SD
20. 9 de Julio I-1	5	Soja Ira	SD
21. 9 de Julio I-2	20	Trigo/Soja	SD
22. Tandil I-1	8	Maíz	SD
23. Tandil I-2	4	Trigo	SD
24. Rivadavia	(sin información)	Maíz	SD
25. Trenque Lauquen	(sin información)	Maíz	SD
26. Maracó	1	Maíz	SD
27. Catriló I-1	> 20	Girasol	LC
28. Catriló I-2	> 20	Maíz	LM
29. Capital	> 20	Girasol	SD

SD: Siembra Directa

LC: Labranza Convencional

LM: Labranza Mínima

Tabla 4- Años de agricultura, cultivo antecesor y sistema de labranza de los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS Cono Sur. Campaña 2001/02.

Partido/ Departamento	Años de Agricultura	Cultivo Antecesor	Sistema de Labranza
30. Tercero Arriba	(sin información)	(sin información)	(sin información)
31. Río Segundo	(sin información)	(sin información)	(sin información)
32. San Jerónimo II-1	> 40	Trigo/Soja	SD
33. Belgrano II-1	20	Maíz	SD
34. Paraná II-2	10	Trigo/Soja	SD
35. Uruguay	>5	Barbecho	LM
36. Marcos Juárez II-1	> 10	Maíz	SD
37. Río Cuarto II-1	> 10	Maíz	SD
38. Constitución	> 15	Sorgo	SD
39. Colón II-1	> 20	Maíz pisingallo	SD
40. S. A. de Areco II-1	8	Maíz	SD
41. Junín II-1	> 20	Maíz	SD
42. Junín II-2	> 10	Maíz	LC
43. 9 de Julio II-1	> 30	Soja	SD
44. General Pinto	4	Maíz	SD
45. Tandil II-1	5	Trigo	SD
46. Capital II-1	4	Maíz	SD

SD: Siembra Directa

LC: Labranza Convencional

LM: Labranza Mínima

4- CARACTERIZACIÓN Y CONDUCCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS DE LA RED

En todos los sitios se condujeron experimentos de campo, instalados en establecimientos de productores o en los predios de Estaciones Experimentales del INTA. En todos los ensayos se implementaron prácticas de manejo adecuadas de modo de posibilitar una alta productividad del cultivo e inducir una demanda elevada de S. Con este fin, se sembraron variedades adaptadas y difundidas en cada zona, con alto potencial de rendimiento, y se mantuvieron los sitios

experimentales desmalezados y libres de plagas durante todo el ciclo. Los cultivos fueron conducidos en condiciones de secano.

Las semillas fueron inoculadas con bacterias de *Bradyrhizobium japonicum* (en doble dosis) para favorecer la nodulación y potenciar la fijación simbiótica de N, debido a que su magnitud es frecuentemente asociada con la disponibilidad de S. Con este mismo propósito, junto al inoculante se agregó un producto comercial a base de Cobalto (0,5 % Co) y Molibdeno (10 % Mo), en dosis de 1 y 20 g ha⁻¹ de cada uno de estos elementos, respectivamente. Ambos nutrientes son considerados esenciales para el proceso de fijación biológica de N (Marschner, 1995; Mengel y Kirby, 2000).

Todos los fertilizantes fueron colocados en bandas al costado y/o por debajo de la línea de siembra, separados de las semillas para evitar efectos de fitotoxicidad.

Los principales datos del manejo efectuado en cada uno de los experimentos se muestran en la Tabla 5 para la campaña 2000/01, y en la Tabla 6 para la campaña 2001/02.

Tabla 5- Fecha de siembra y cosecha, variedad y espaciamento entre surcos utilizados en los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS Cono Sur. Campaña 2000/01.

Partido/Departamento	Fecha siembra	Fecha Cosecha	Variedad	Espaciamento
1. San Jerónimo I-1	23/11/00	28/3/01	ACA R 405	70 cm
2. Las Colonias	16/11/00	29/3/01	ACA R 405	38 cm
3. Belgrano I-1	7/11/00	26/3/00	DM 4800 RR	52 cm
4. Paraná I-1	7/12/00	(sin inform)	A 6445 RG	52 cm
5. Paraná I-2	20/11/00	(sin inform)	DM 4800 RR	52 cm
6. Río Cuarto I-1	17/11/00	20/4/01	DM 4800 RR	70 cm
7. Marcos Juárez I-1	29/11/00	23/4/01	DM 4800 RR	70 cm
8. Marcos Juárez I-2	20/11/00	16/4/01	DM 4800 RR	70 cm
9. Iriondo	21/11/00	(sin inform)	DM 4800 RR	70 cm
10. Caseros	4/12/02	20/4/01	DM 4800 RR	52 cm
11. General López	27/11/00	1/4/01	A 4100 RG	70 cm
12. Colón I-1	8/12/00	26/4/01	DM 48	52 cm
13. Pergamino I-1	16/11/00	(sin inform)	A 4100 RG	70 cm
14. Pergamino I-2	28/10/00	20/4/01	A 4100 RG	70 cm
15. S. A. de Areco I-1	18/11/00	27/4/01	A 4456 RG	52 cm
16. S. A. de Areco I-2	18/11/00	27/4/01	A 4456 RG	52 cm
17. Rojas	28/11/00	5/5/01	DM 4800 RR	70 cm
18. Junín I-1	29/11/00	12/4/01	A 4456 RG	52 cm
19. Junín I-2	20/11/00	3/4/01	DM 4300 RR	70 cm
20. 9 de Julio I-1	30/11/00	28/4/01	DM 3800 RR	52 cm
21. 9 de Julio I-2	29/11/00	25/4/01	DM 4800 RR	70 cm
22. Tandil I-1	29/11/00	25/4/01	DM 4800 RR	35 cm
23. Tandil I-2	28/11/00	(sin inform)	DM 4800 RR	35 cm
24. Rivadavia	27/10/00	10/4/01	A 3401 RG	70 cm
25. Trenque Lauquen	4/11/00	14/5/01	DM 3800 RR	52 cm
26. Maracó	10/11/00	11/4/01	DM 4000 RR	40 cm
27. Catriló I-1	24/11/00	23/4/01	A 4100 RG	40 cm
28. Catriló I-2	26/11/00	20/4/01	P 9396 RR	35 cm
29. Capital	30/11/00	17/4/01	P 9396 RR	40 cm

Tabla 6- Fecha de siembra y cosecha, variedad y espaciamento entre surcos utilizados en los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS Cono Sur. Campaña 2001/02

Partido/Departamento	Fecha siembra	Fecha Cosecha	Variedad	Espaciamento
30. Tercero Arriba	(sin inform)	(sin inform)	(sin inform)	(sin inform)
31. Río Segundo	(sin inform)	(sin inform)	(sin inform)	(sin inform)
32. San Jerónimo II-1	20/11/01	3/4/02	DM 4800 RR	52 cm
33. Belgrano II-1	3/11/01	(sin inform)	DM 4800 RR	52 cm
34. Paraná II-1	18/12/01	9/5/02	Mercedes 70	52 cm
35. Uruguay	14/11/01	9/5/02	A 5409 RG	52 cm
36. Marcos Juárez II-1	16/11/01	26/4/02	DM 4800 RR	70 cm
37. Río Cuarto II-1	23/11/01	9/5/02	DM 4800 RR	70 cm
38. Constitución	26/11/01	(sin inform)	DM 4800 RR	38 cm
39. Colón II-1	9/11/01	4/4/02	A 4201 RG	52 cm
40. S.A. de Areco II-1	11/11/01	20/4/02	DM 4800 RR	52 cm
41. Junín II-1	2/11/01	22/3/02	DM 4400 RR	70 cm
42. Junín II-2	19/11/01	9/4/02	DM 4800 RR	70 cm
43. 9 de Julio II-1	1/12/01	3/5/02	DM 4800 RR	52 cm
44. General Pinto	8/12/01	22/4/02	DM 4800 RR	52 cm
45. Tandil II-1	17/11/01	23/4/02	DM 3800 RR	38 cm
46. Capital II-1	20/11/01	17/4/02	P 9396 RR	35 cm

5- EVALUACIÓN DE RENDIMIENTOS Y CÁLCULO DE LA RESPUESTA A S

Los ensayos se cosecharon en forma mecánica (mediante cosechadoras automotrices) o manual. Cuando se utilizó cosecha mecánica, esta se realizó sobre una superficie que varió entre 56 y 2000 m². Las muestras de grano fueron pesadas en balanzas con una precisión que varió entre 0,1 a 5 kg ha⁻¹, dependiendo de la superficie cosechada, y, dentro de cada ensayo, los rendimientos de las parcelas fueron uniformados a un mismo valor de humedad. En cambio, cuando se efectuó cosecha manual, se realizó tomando muestra/s representativa/s (de una a cinco) en cada una de las parcelas evaluadas. Las

muestras fueron trilladas en máquinas estacionarias, y el grano pesado en balanzas con una precisión < 0,1 kg. Al igual que los ensayos cosechados en forma mecánica, los rendimientos de los diferentes tratamientos fueron corregidos a un idéntico valor de humedad y analizados por análisis de varianza. Estos rendimientos, promedio de dos, tres o cuatro repeticiones, se muestran en el **Capítulo IV**. Para estudiar la asociación entre la respuesta al agregado de S y las variables de suelo y cultivo se utilizaron procedimientos de regresión lineal simple y múltiple, y una adaptación del método de cuadrantes de Cate y Nelson (Cate y Nelson, 1965). Se estudió si la respuesta difería por efecto de variables categóricas relacionadas con el manejo del cultivo, a través de análisis de varianza de una vía.

El cálculo de la respuesta se realizó en forma diferencial para las evaluaciones de suelo y foliares. Para las evaluaciones de suelo, la respuesta se calculó como un promedio de las diferencias en rendimiento entre los tratamientos fertilizados con S y los tratamientos testigo sin S, tuvieran o no fertilización fosforada de base, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Respuesta a S} = [(T2-T0) + (T3-T1)]/2$$

Previo al cálculo de la respuesta, se analizó la interacción PxS (evaluada eliminando del análisis al tratamiento “completo”, T4). Dicha interacción no fue estadísticamente significativa en 41 de los 46 sitios ($P > 0,10$), lo cual habilita en estos 41 ensayos a calcular la respuesta como fue expresado en la ecuación anterior. Los ensayos con interacción PxS estadísticamente significativa fueron Junín I-2 ($P=0,0859$), 9 de Julio I-1 ($P=0,0175$), Catriló I-1 ($P=0,0269$), Catriló I-

2 ($P=0,032$) y Junín II-2 ($P=0,0150$). De ellos, los ensayos Catriló I-1 y Junín II-2 no fueron tenidos en cuenta en el análisis final de los datos, por razones estadísticas (ver Capítulo IV, **3.a.2**) o metodológicas (ver Capítulo IV, **3.b.2**), respectivamente. Los restantes ensayos con interacción PxS significativa expresaron diferencias de rendimiento negativas entre los tratamientos fertilizados y sus testigos en algunas de las comparaciones (T3 vs T1 en Junín I-2 y 9 de Julio I-1, y T2 vs T0 en Catriló I-2), sin que estas tuvieran una explicación aparente. En todos los casos, la restante diferencia resultó positiva a favor de los tratamientos fertilizados. No hay evidencias que justifiquen este comportamiento diferencial entre ambas situaciones de fertilización con P. Para atenuar las desviaciones (especialmente las negativas) resultantes de las diferencias individuales sin recurrir a la eliminación de tratamientos dentro de un ensayo particular, la respuesta en estos sitios se calculó de la misma manera que en aquellos en los que la interacción PxS no fue estadísticamente significativa. Luego, se estudió la capacidad de las variables de suelo para explicar esta respuesta media.

Para los análisis foliares se dispuso de un valor *por tratamiento* en cada bloque, a diferencia de los análisis de suelo donde se disponía de un único valor *por repetición*. Entonces, la respuesta al S se calculó en forma separada: (T2-T0) y (T3-T1) y el valor resultante se relacionó con las respectivas variables independientes, consideradas también en forma separada. De esta manera, se pretendió estudiar si el agregado de P podía producir una modificación de la concentración de S en los tejidos foliares de la planta o en los índices de cultivo evaluados. El detalle de estos procedimientos y la definición de las variables

correspondientes se especifica en el **Capítulo IV**, para los análisis de suelo, y en el **Capítulo V** para las evaluaciones foliares.

CAPITULO III

REQUERIMIENTOS DE S DE LA SOJA

1- INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los requerimientos nutricionales de un cultivo, cotejado con la capacidad del suelo para satisfacerlos, es un paso necesario para determinar las necesidades de fertilización. Las estrategias que contemplan la reposición de los nutrientes exportados por los granos de cosecha, basan el cálculo de la dosis a aplicar en una adecuada estimación de los requerimientos y de la fracción exportada de los principales elementos, en la región pampeana N, P y S.

Los requerimientos de S (kg S en materia seca aérea total t^{-1} de grano producido) del cultivo de Soja informados en la bibliografía son dispares, como los que pueden derivarse de Hoelt y Fox (1986) o Scheiner et al. (2000), de 2,65 y 3,14 $kg t^{-1}$ respectivamente, y los mencionados por Stanford y Jordan (1966) de 7,25 $kg t^{-1}$. Por su parte, Deloch (citado por Marschner, 1995) menciona un porcentaje de S en grano de 0,32, valor que en base a un índice de cosecha para este nutriente de 0,67 (García, 2000), representaría un requerimiento del orden de 4,78 $kg t^{-1}$ de grano. Lavado et al. (2001) determinaron concentraciones menores (0,22-0,26 %), las cuales, de acuerdo al razonamiento anterior, equivaldrían a una necesidad de 3,28 a 3,88 $kg t^{-1}$. González (2000), considerando el contenido de S promedio de 46 muestras de grano, sugiere una exportación de 1,3 $kg t^{-1}$ de grano. Con un supuesto índice de cosecha de 0,67 los requerimientos derivados de este valor serían de 1,94 $kg t^{-1}$ de grano. Entre las causas que provocan estas importantes diferencias, puede mencionarse a la absorción de nutrientes en cantidades superiores a las necesarias para lograr un óptimo crecimiento. Los cultivos alcanzan este consumo “de lujo” cuando el suelo está muy bien provisto

del elemento, y en el caso del S esto se ve facilitado por ser un nutriente demandado en cantidades relativamente pequeñas si se lo compara con otros macronutrientes como N o K. Por otra parte, muchos de los valores mencionados precedentemente provienen de recopilaciones bibliográficas, y fueron determinados en experimentos conducidos en otros países, bajo condiciones productivas y de suelo diferentes, y con variedades de Soja distintas a las comúnmente utilizadas en la región sojera argentina. Este último factor, a su vez, introduce cambios en la producción de materia seca total y el índice de cosecha del cultivo, lo cual incide también en los requerimientos y exportación de S. En función de la escasez de información local debidamente validada, se estudió la evolución de la tasa de absorción de S durante el ciclo del cultivo de Soja, sus requerimientos y la fracción del nutriente que es exportada con los granos (índice de cosecha).

2- METODOLOGÍA UTILIZADA

En parcelas implantadas con este propósito, durante las campañas 1999/00 y 2001/02 se realizaron experimentos tendientes a determinar la curva de absorción de S en Soja. Durante el primer ciclo, se utilizó la variedad Nidera A 4100 RG, la que se sembró el día 6/11/1999 espaciada a 70 cm entre hileras y en labranza convencional. En el segundo año se utilizó la variedad Don Mario 3800 RR, sembrada en labranza convencional el día 27/11/2001 a una distancia de 52,5 cm entre hileras. En ambos casos la semilla fue inoculada, para que una eventual deficiencia de N no condicionara la absorción de S. Para asegurar un adecuado abastecimiento de S al cultivo, en ambas campañas se realizó una aplicación de 15

kg S ha⁻¹ en forma de Tiosulfato de Amonio (12-0-0-26S). Dada su formulación líquida, el fertilizante se aplicó chorreado en el centro de los entresurcos. En la campaña 1999/00 el fertilizante fue agregado 15 días antes de la siembra, mientras que en el ciclo 2001/02 la aplicación se realizó al estado de “cracking” (inicio de la emergencia).

A lo largo del período de cultivo se tomaron muestras de la parte aérea de plantas en cuatro sectores de 0,5 m² cada uno, a excepción del primer corte del año 1999 en el que las muestras extraídas fueron tres. Los muestreos se realizaron en sitios con densidad uniforme de plantas, cortando las mismas a ras del suelo, en los siguientes estadios fenológicos (Fehr y Caviness, 1977): V3 (tres hojas expandidas), R2 (plena floración), R5 (inicio de formación de granos), R7 (al menos una vaina amarillenta en el tallo principal) y R8 (madurez de cosecha). Las plantas enteras de cada corte fueron separadas en hojas (láminas + pecíolos) y tallos (V3 y R2); hojas (láminas + pecíolos), tallos y vainas (R5); hojas (láminas + pecíolos), tallos, vainas y granos (R7); y tallos, vainas y granos (R8). Las hojas y pecíolos caídos producto de la senescencia fueron recolectados en R7, pero no en R8. Las diferentes submuestras fueron secadas hasta peso constante en estufa de circulación forzada a 60 °C, pesadas con balanza de precisión < 0,01 g y después molidas en un molino tipo Willey (< 1 mm). Finalmente, para cada una de ellas se calculó la materia seca producida por unidad de superficie y se determinó el contenido de S [digestión con ácido nítrico y ácido perclórico, determinación por turbidimetría, de acuerdo con la metodología descrita por Lisle et al., 1994)].

Esta evaluación permitió cuantificar la acumulación de materia seca y de S durante el ciclo de la Soja, y la exportación del nutriente con el grano cosechado.

3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.a- ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA Y S EN SOJA

En las Tablas 7 y 8 se detalla la acumulación de materia seca en diferentes órganos de la planta para las campañas 1999/00 y 2001/02, respectivamente.

Tabla 7- *Acumulación de materia seca (kg ha^{-1}) en diferentes estadios fenológicos de la Soja. Campaña 1999/00. Valores promedio de cuatro muestras (tres en el estadio V3).*

	Estadio				
	V3	R2	R5	R7	R8
Hojas	215	462	1963	1982	
Tallos	63	181	1107	1268	1352
Vainas			403	1288	1180
Granos				2811	3160
M Seca Total	278	643	3473	7349	5692

Tabla 8- *Acumulación de materia seca (kg ha^{-1}) en diferentes estadios fenológicos de la Soja. Campaña 2001/02. Valores promedio de cuatro muestras.*

	Estadio				
	V3	R2	R5	R7	R8
Hojas	239	1420	3359	1657	
Tallos	64	581	1888	1735	1775
Vainas			1339	1423	1497
Granos				3475	4712
M Seca Total	303	2001	6586	8290	7984

La productividad alcanzada fue diferente en los dos años. Mientras en la campaña 1999/00 el cultivo estuvo afectado por una moderada sequía que condicionó su desarrollo, en el ciclo 2001/02 los niveles de crecimiento y rendimiento logrados fueron óptimos. La máxima acumulación de materia seca en grano se alcanzó recién en R8. En cambio, en R7 se registró la máxima acumulación de materia seca total, debido a que en este estado todavía no se había producido la senescencia foliar del cultivo.

En las Tablas 9 y 10 se presentan los valores de concentración de S determinados en ambas campañas para los diferentes momentos de corte y órganos de la planta. Como tendencia general, se observa una paulatina disminución en el contenido de S a medida que transcurre el ciclo del cultivo. Para la campaña 1999/00, esto se debió a que la absorción de S se anticipó a la acumulación de materia seca. Luego, el crecimiento de la planta diluyó la concentración del nutriente en los tejidos. Para los dos años de ensayo además se explica por la diferente proporción de tejidos: a comienzos del ciclo hay mayor proporción de hojas, que contienen más S que los tallos. Tanto en hojas como en tallos debe agregarse como factor adicional la translocación de S hacia vainas y granos durante el período reproductivo.

Tabla 9- Concentración de S (%) en órganos vegetativos y reproductivos durante el ciclo de la Soja. Campaña 1999/00. Promedio de cuatro muestras (tres en el estadio V3).

	Estadio				
	V3	R2	R5	R7	R8
Hojas	1,65	0,69	0,40	0,14	
Tallos	1,33	1,08	0,35	0,11	0,14
Vainas			0,38	0,06	0,10
Granos				0,30	0,37

Tabla 10- Concentración de S (%) en órganos vegetativos y reproductivos durante el ciclo de la Soja. Campaña 2001/02. Promedio de cuatro muestras.

	Estadio				
	V3	R2	R5	R7	R8
Hojas	0,20	0,19	0,20	0,11	
Tallos	mp	0,16	0,15	0,14	0,06
Vainas			0,20	0,11	0,06
Granos				0,24	0,23

mp: muestra perdida por disponerse de una cantidad insuficiente para realizar el análisis químico.

La bibliografía presenta en general valores de determinaciones foliares en láminas sin pecíolos, las cuales tienen mayor concentración de S respecto de aquellas que lo incluyen, como este trabajo. Ferraris et al. (2001 *a*) observaron en V3 concentraciones de entre 0,13 y 0,15 % de S para tratamientos fertilizados. En inicios de floración (R1 o R2) se han observado valores de suficiencia en láminas foliares de 0,24 % (Flannery, 1989), 0,25 % (Martins, citado por Yamada, 1999), o rangos de suficiencia de 0,21 a 0,40 % (Sfredo et al., 1986). En nuestro país, Galarza et al. (2000) han observado concentraciones de 0,15 a 0,18 % en parcelas

fertilizadas con S, y Fontanive et al. (1996) un rango de 0,19 a 0,31 % S en diferentes variedades de grupo V de maduración. En el estadio R5 Ferraris et al. (2001 *a*) observaron concentraciones de 0,30-0,31 %, y Fontanive et al. (1996) un rango de 0,14-0,20 % en las condiciones antes comentadas. Como ya fuera expresado, todas las determinaciones mencionadas en la bibliografía corresponden a hojas sin pecíolos, a excepción de los valores mencionados por Fontanive et al, (1996).

Además de las determinaciones foliares, los granos son un órgano comúnmente analizado para evaluar su concentración. Deloch, (citado por Marschner, 1995) y Hoefl y Fox (1986) mencionan porcentajes de S en grano de 0,32 y 0,19, respectivamente. Lavado et al. (2001) determinaron concentraciones en un rango de 0,22-0,26 %. González (2000), considerando el promedio de 46 muestras de grano, sugiere una concentración media de 0,13 %. En general, los valores de la bibliografía se acercan más a los del segundo año (Tabla 10), aunque se observa una gran variabilidad, lo cual se explica por los bajos requerimientos de S de los cultivos (comparado con los de N o K). Esto permite que, ante disponibilidades muy elevadas de S, haya consumo de lujo y el nutriente se acumule en los tejidos en una concentración que puede superar varias veces la necesaria para un crecimiento normal.

En las Figuras 1 y 2 se muestra la acumulación de materia seca total y discriminada para los diferentes órganos de la planta.

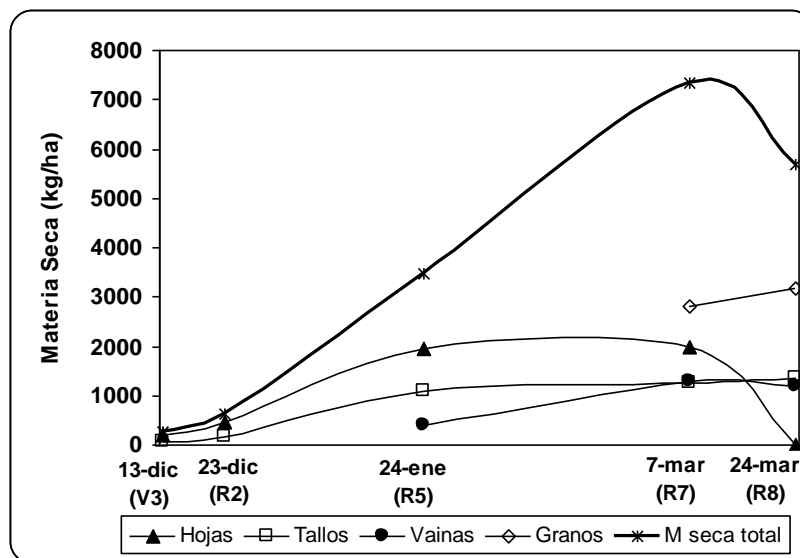


Figura 1- Acumulación de materia seca total y en diferentes órganos de la planta de Soja. Valores promedio de tres muestras (Estado V3) y cuatro muestras (R2, R5, R7 y R8). Campaña 1999/00.

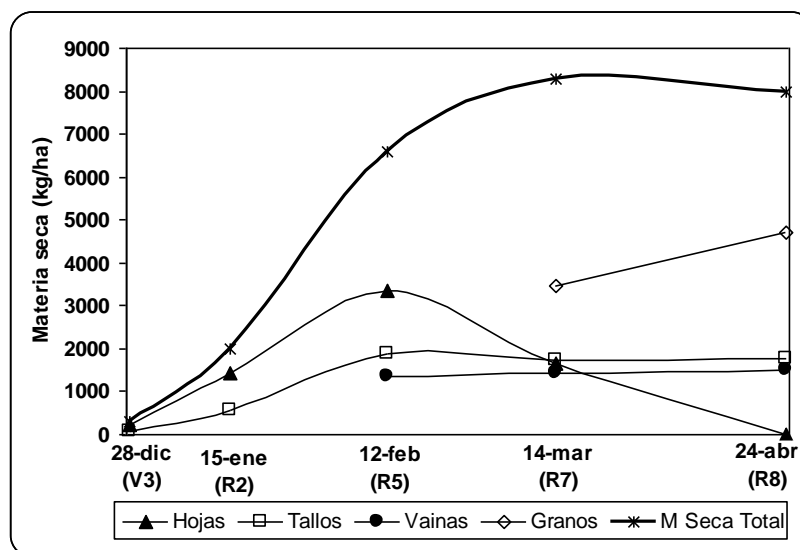


Figura 2- Acumulación de materia seca total y en diferentes órganos de la planta de Soja. Valores promedio de cuatro muestras. Campaña 2001/02.

Puede advertirse que la acumulación de materia seca es muy escasa hasta floración, y posteriormente comienza a incrementarse en forma sostenida hasta

R7, siguiendo una tendencia lineal para la campaña 1999/00 y ligeramente curvilínea en la campaña 2001/02. Entre R7 y R8, en cambio, se observa una disminución en la materia seca total debido a la pérdida del área foliar, compensada en parte por la fase final de acumulación de materia seca (“llenado”) en los granos.

Basándose en los datos de acumulación de materia seca y de concentración de S, se calculó la acumulación del nutriente en las distintas estructuras de la planta a lo largo del ciclo del cultivo para ambos años de ensayos (Figuras 3 y 4). En la campaña 2001/02, la concentración de S en tallos no pudo determinarse en el estado V3, ya que la cantidad de muestra disponible era insuficiente para realizar el análisis químico. Por lo tanto, el S acumulado se estimó asignándole igual proporción en relación con el contenido de S foliar registrado durante el muestreo de 1999/00. Es decir, en el experimento de la campaña 1999/00 el S acumulado en tallos ($0,84 \text{ kg ha}^{-1}$) alcanzó en el estado V3 al 23,7 % del S incorporado en las hojas ($3,55 \text{ kg ha}^{-1}$). Entonces, si en la campaña 2001/02 se determinó una acumulación de $0,48 \text{ kg ha}^{-1}$ en las hojas, respetando las mismas proporciones, el S incorporado en los tallos para el mismo estado alcanzaría solamente a $0,11 \text{ kg ha}^{-1}$.

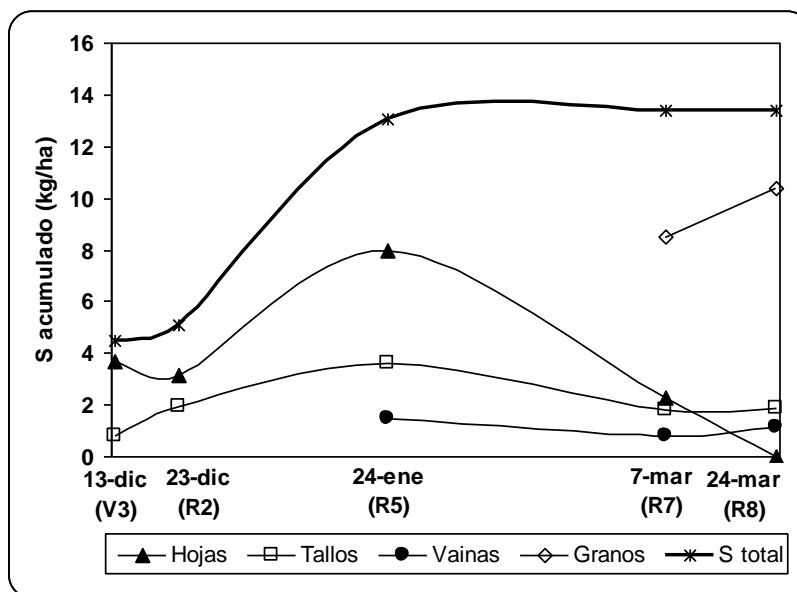


Figura 3- Acumulación de S en planta entera y en diferentes órganos del cultivo de Soja. Valores promedio de tres muestras (Estado V3) y cuatro muestras (R2, R5, R7 y R8). Campaña 1999/00.

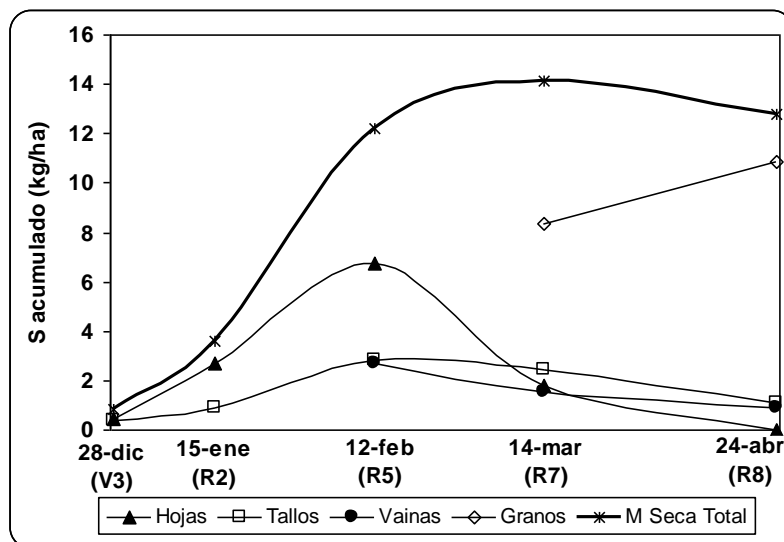


Figura 4- Acumulación de S en planta entera y en diferentes órganos del cultivo de Soja. Valores promedio de cuatro muestras. Campaña 2001/02.

Se determinó una tendencia hacia una acumulación de S anticipada a la de materia seca durante la campaña 1999/00, aunque en 2001/02 las curvas no muestran evidencias de adelantarse una respecto de la otra. La fase de más rápida absorción se inicia alrededor de R2, y alcanza valores iguales (campaña 1999/00) o cercanos al máximo (campaña 2000/01) ya en el estadio R5. Durante este período (R2-R5) se registraron en ambos años las máximas tasas de absorción (0,25 y 0,31 kg S ha⁻¹ día⁻¹ para las campañas 1999/00 y 2001/02, respectivamente), producidas por la suma de acumulación en hojas y tallos, en coincidencia con lo observado por Scheiner et al. (2000). Hasta R5 el S se reservó en hojas, tallos y vainas, para translocarse después hacia los granos en crecimiento mayormente a partir de las hojas. Como se desprende de las Figuras 3 y 4, las vainas se transforman rápidamente de órganos destino a fuentes de nutrientes para los granos en formación. Si bien la frecuencia de muestreo no fue suficiente como para detectar la fase de incremento, a partir de R5 puede visualizarse una paulatina disminución en el contenido de S de estos órganos, aunque el valor determinado para R8 durante la campaña 2001/02 no se corresponde con esta tendencia. El temprano cambio en el balance de asimilación – exportación de nutrientes por parte de las vainas fue también informado por Sunarpi y Anderson (1997).

3.b- REQUERIMIENTOS DE S DE LA SOJA

La absorción total de S alcanzó a 13,38 y 14,16 kg ha⁻¹ en el estadio R7, y 14,76 y 12,80 kg ha⁻¹ en el estadio R8 para las campañas 1999/00 y 2001/02, respectivamente. Como ocurriera con la materia seca, la pérdida del S incorporado

en los órganos vegetativos (principalmente hojas) entre R7 y R8 fue compensada parcial o totalmente por la acumulación de S en grano, que continuó incrementándose hasta la madurez de cosecha del cultivo.

En la Tabla 11 se muestran los requerimientos de S determinados en ambas campañas.

Tabla 11- *Producción de materia seca total y en grano, requerimientos y exportación de S del cultivo de Soja. Los valores corresponden al estado R8, para los cultivares Nidera A 4100 RG (campaña 1999/00) y Don Mario 3800 RR (campaña 2001/02).*

	Campaña 1999/00	Campaña 2001/02
Materia seca total (kg ha⁻¹)	5692	7984
Materia seca de grano (kg ha⁻¹)	3160	4712
Absorción total de S (kg ha⁻¹)	14,76	12,80
Requerimientos de S (kg t⁻¹ de m seca total)	2,59	1,60
Requerimientos de S (kg t⁻¹ de m seca en grano)	4,67	2,72
Exportación de S de la parcela (kg ha⁻¹)	11,69	10,84
Índice de cosecha aparente de S	0,79	0,85
Exportación de S con los granos (kg t⁻¹ de materia seca en grano)	3,70	2,30

Los requerimientos de S cuantificados en el segundo año de estos experimentos son muy cercanos a los reportados en nuestro país por Scheiner et al. (2000) y al derivado de Hoefl y Fox (1986). En cambio, en la experiencia de la campaña 1999/00 los requerimientos fueron algo mayores, y podrían atribuirse a

cierto consumo de lujo derivado de un cultivo de menor productividad, con limitantes para el rendimiento (déficit hídrico) pero buena disponibilidad de S. Para la campaña 2001/02, habría que descartar una posible deficiencia de S como causa de los bajos requerimientos señalados, ya que se trató de una parcela fertilizada con una dosis mayor a la cantidad de S que después fue absorbida en la parte aérea de la planta. Lotes con deficiencia de S podrían presentar una demanda del nutriente por unidad de biomasa menor aún de la que ha sido determinada en estos experimentos.

Los requerimientos aquí presentados son sensiblemente inferiores al valor comúnmente aceptado de 7 kg de S acumulados en biomasa por t de grano producido (García, 2000), y podrían contribuir a explicar la escasa frecuencia de respuesta observada en los experimentos de esta red, como se detalla en el **Capítulo IV**. En cambio, los índices de cosecha de S son muy altos, mayores al presentado por García (2000), y muy superiores a los mencionado para otros cultivos, de 0,45 en Maíz, 0,38 en Girasol y 0,25 en Trigo (García, 2000; Ferraris, 2001).

3.C- CURVAS DE DILUCIÓN DE S EN SOJA

Con los datos de acumulación de materia seca y contenido de S se puede elaborar la curva de dilución del nutriente, la que indica la mínima concentración necesaria del mismo para alcanzar una cantidad de biomasa y un rendimiento dados. Esta concentración es denominada concentración crítica, y varía de acuerdo a la biomasa aérea acumulada y al nivel de rendimiento que finalmente alcance el cultivo. Tales curvas han sido utilizadas para diagnosticar deficiencias

de N en Maíz (Andrade et al., 1996) y Girasol (Merrien, 1992; Sosa et al., 1999). Sin embargo, aunque ha sido mucho menos estudiado, podrían ser utilizadas también para otros nutrientes y otros cultivos (Andrade et al., 1996). En general, definido un determinado nivel de productividad, dentro de una misma especie estas curvas son válidas para diferentes ambientes (Greenwood et al., 1990).

Las curvas de dilución para estos experimentos fueron graficadas hasta R7, que es el estadio fenológico en que el cultivo alcanzó el valor máximo de materia seca total. En las Figuras 5 y 6 se muestran, para ambas campañas, las curvas de dilución de S en función de la biomasa aérea total y de la biomasa de hojas (láminas más pecíolos), respectivamente. El porcentaje de S graficado en cada figura se determinó calculando el promedio ponderado de la concentración de S en cada órgano por el peso seco relativo de ese órgano en relación al peso seco total.

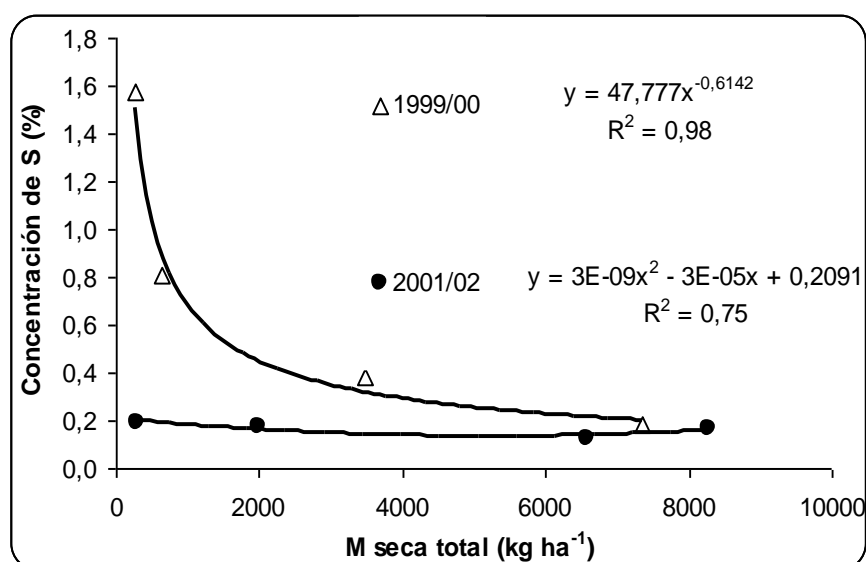


Figura 5- Concentración de S en biomasa aérea en función de la materia seca acumulada. Campañas 1999/00 (triángulos vacíos) y 2001/02 (círculos llenos).

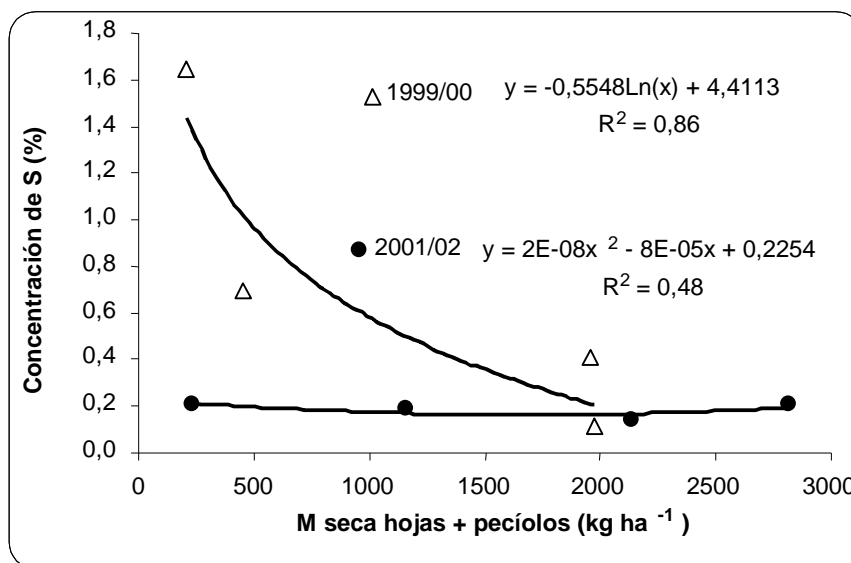


Figura 6- Concentración foliar de S en función de la materia seca acumulada en hojas más pecíolos. Campañas 1999/00 (triángulos vacíos) y 2001/02 (círculos llenos).

Los valores de concentración de S en función de la materia seca se ajustaron por regresión, utilizando los programas Microsoft Excel 2000 y Table Curve 2D Windows versión 7. Se evaluaron ecuaciones de tipo lineal simple, logarítmica, potencial, exponencial, Mitscherlich y polinomial de segundo orden, seleccionándose la función que maximizó el coeficiente de determinación (R^2). Los valores obtenidos para la campaña 1999/00 presentan un muy buen ajuste ($R^2=0,98$) con una función potencial decreciente. En cambio, en la campaña 2001/02 una ecuación cuadrática sólo logro un ajuste de $R^2=0,75$ debido a la menor pendiente de la curva (Figura 5). La curva de dilución de S en hojas mostró un ajuste menor en ambas campañas (Figura 6), manteniendo la tendencia a una pendiente decreciente y con mayor correlación para el primer año de ensayos, y de inferior valor para el segundo. Otros autores, trabajando con N en Soja y otras

especies, han encontrado una tendencia decreciente tal como se determinó para la campaña 1999/00 (Grenwood et al., 1990; Andrade et al., 1996). Claramente, ambas campañas representan dos poblaciones de datos diferentes, ya que en el ciclo 2001/02 con una menor concentración de S para cada nivel de biomasa inferior a 7000 kg ha⁻¹ se podría obtener un rendimiento un 50 % superior al de la campaña 1999/00. Entre las causas que podrían explicar este comportamiento, puede mencionarse el diferente nivel de productividad alcanzado y, especialmente, la diferente tasa de crecimiento observada en ambas campañas. En el ciclo 2001/02, la tasa de acumulación de materia seca alcanzó a 9,8; 94,4 y 163,8 kg ha⁻¹ día⁻¹ para los períodos Siembra-V3, V3-R2 y R2-R5, respectivamente, frente a 7,5; 36,6 y 88,4 kg ha⁻¹ día⁻¹ para las mismas etapas en el ciclo 1999/00. La tasa de acumulación de S para los mencionados períodos fue de 0,03, 0,15 y 0,31 kg ha⁻¹ día⁻¹ en la campaña 2001/02, y de 0,12; 0,06 y 0,25 kg S ha⁻¹ día⁻¹ en el ciclo 1999/00. Scheiner et al. (2000) observaron una dinámica similar a la registrada en la campaña 2001/02, aunque las tasas máximas determinadas por estos autores no superaron los 0,20 kg S ha⁻¹ día⁻¹. Cabe destacar que mientras la tasa de crecimiento para los períodos antes mencionados fue en promedio un 91 % superior en la campaña 2001/02, la tasa de acumulación de S solamente se incrementó en un 38 % respecto del primer año de ensayos. El aumento relativamente mayor en la tasa de crecimiento explicaría entonces una dilución superior y por ende una menor concentración de S en los tejidos de la planta, sobre todo en las etapas iniciales del ciclo, tal como se determinó en la campaña 2001/02. Desde R5 a R7 la tendencia se invirtió, siendo la tasa de

acumulación de materia seca superior para la campaña 1999/00 ($90,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ vs $56,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ para la campaña 2001/02). Este hecho, junto a una tasa de absorción de S de escasa magnitud para dicho período en ambas campañas, habría sido el motivo por el cual las curvas de dilución se acercaron alrededor del valor de 7000 kg ha^{-1} de materia seca, el que fue alcanzado a comienzos del período R5-R7 durante el ciclo 2001/02, y hacia finales del mismo en la campaña 1999/00.

4- CONCLUSIONES

- Los requerimientos de S determinados durante las campañas 1999/00 y 2001/02 fueron de $4,67$ y $2,72 \text{ kg S t}^{-1}$ de grano, respectivamente, en cultivares de Soja de ciclo corto. Los valores del primer año podrían considerarse cercanos al promedio del rango que menciona la literatura. Los del segundo año, en cambio, se encuentran entre los más bajos, pero son similares y aún superiores a los determinados localmente. La diferencia entre ambos experimentos podría atribuirse a cierto consumo de lujo por parte de la Soja cultivada en la campaña 1999/00.
- El índice de cosecha aparente (sin considerar hojas caídas) de S fue de $0,79$ para la campaña 1999/00 y $0,85$ para la campaña 2001/02, ambos notablemente superiores a los reportados para S en otros cultivos. La exportación de S alcanzó a $3,70$ y $2,30 \text{ kg S t}^{-1}$ de grano, para los ciclos 1999/00 y 2001/02, respectivamente.
- Durante la campaña 1999/00 el cultivo debió incorporar $14,76 \text{ kg S ha}^{-1}$ para producir 3160 kg ha^{-1} de grano. En el experimento de la campaña 2001/02, en cambio, se necesitaron $12,80 \text{ kg ha}^{-1}$ de S para producir 4711 kg ha^{-1} de grano. A la luz de estos resultados, la exigencia de S del cultivo ha sido frecuentemente

sobreestimada, y podría explicar la baja frecuencia de respuesta observada en esta red de ensayos (**Capítulo IV**).

➤ La dinámica de absorción de S varió sustancialmente entre ambas campañas. En el ciclo 1999/00 se acumuló en alta concentración en hojas y tallos durante los primeros estadios de desarrollo, disminuyendo luego rápidamente a medida que se redistribuía hacia los destinos reproductivos. La acumulación de S fue anticipada a la de materia seca, y hubo una marcada dilución de la concentración del nutriente en los tejidos, de acuerdo con una función potencial decreciente. En la campaña 2001/02, en cambio, si bien pudo observarse la translocación desde hojas y tallos hacia los destinos reproductivos, la concentración máxima de S alcanzada en los primeros estadios fue mucho menor que en el primer año, y recién se pudo detectar una disminución de la concentración del nutriente hacia la madurez del cultivo. Como consecuencia, la acumulación de materia seca y S fueron más sincrónicas, y a lo largo de todo el ciclo prácticamente no se observó dilución del nutriente, cuya concentración siguió una tendencia de tipo cuadrática.

CAPITULO IV

**CARACTERIZACION DE LA RESPUESTA A S. EVALUACION DE LOS
ANALISIS DE SUELO COMO HERRAMIENTA DE DIAGNOSTICO**

1- INTRODUCCIÓN

Los análisis de suelo son una herramienta tradicional, comúnmente utilizada para la detección de deficiencias en prácticamente todos los nutrientes minerales necesarios para el crecimiento de los cultivos. La obtención de un método para el diagnóstico de fertilidad azufrada en Soja de primera basado en el análisis de suelo, tendría como ventaja su practicidad, el conocimiento generalizado que existe sobre la forma de tomar correctamente las muestras (de relevante importancia en el resultado final de dichos análisis), por ser una práctica habitual entre los productores y asesores, y el mérito de permitir aprovechar la infraestructura y el equipamiento del que disponen los laboratorios para el análisis de otros nutrientes (Ferrari et al., 1999 *b*). La determinación de sulfatos en suelos, un parámetro usualmente cuantificado para elaborar recomendaciones de fertilización, ha mostrado hasta el momento un escaso valor predictivo en la región pampeana, y no se dispone de un método de diagnóstico calibrado que establezca un nivel crítico por debajo del cual es probable una respuesta positiva al agregado de S. Sin embargo, en otros lugares del mundo esta prueba ha sido utilizada con éxito para predecir la respuesta a la fertilización (Anderson et al., 1992; Ajwa y Tabatabai, 1993; Blair et al., 1993; Zhao y Mc Grath, 1994; Watkinson y Kear, 1996; Prietzel y Hirsch, 2000). Para la toma de muestras de suelo destinadas a evaluar sulfatos, la profundidad de 60 cm se considera suficiente ya que el contenido no valorado por debajo se compensa con la ineficiencia de las raíces para absorber el 100 % del nutriente existente a esa profundidad (Johnson, 1987). Más aún, para otros nutrientes móviles en el suelo,

como es el caso del N, se ha encontrado una buena asociación entre la disponibilidad en superficie (0-20 cm) y a mayor profundidad (0-60 cm) (Alvarez y Alvarez., 2000).

Adoptando un enfoque alternativo, algunos autores sostienen que la mayor probabilidad de respuesta a la fertilización azufrada está asociada a cultivos de alto rendimiento, y en suelos arenosos y profundos, sin horizonte B textural (Johnson, 1987). También se han efectuado recomendaciones de fertilización con S sobre la base de condiciones texturales de suelo (Johnson, 1987), N aportado con el fertilizante (Johnson, 1987; Johnson y Fixen, 1990) y otros factores relacionados, pero sin precisar valores o rangos críticos para algún análisis en particular.

Por otra parte, tampoco se ha establecido que el contenido de sulfatos previo a la siembra sea la mejor manera de evaluar la capacidad del suelo para suministrar S a los cultivos. En otros países se ha propuesto la utilización de un índice que integra el contenido inicial de sulfatos en el suelo más una estimación del mineralizable determinada a partir de una incubación corta de ese mismo suelo (Jones, 1986; Messick, 1992; Ghani, 1994). Este enfoque se fundamenta en que alrededor del 95 % del S del suelo forma parte de compuestos orgánicos (Ericksen et al., 1998). La mayor parte de ese S esta ligado indirectamente al Carbono (C), por intermedio del Oxígeno (O) o del N (Blair et al., 1993; Marschner, 1995), constituyendo la fracción orgánica más lábil, capaz de tornarse rápidamente disponible para las plantas (Ericksen, 1997 *a, b*; Ericksen et al., 1998). Diversos procedimientos han sido utilizados para realizar estas incubaciones, variando entre

ellos respecto al tamaño de la muestra de suelo, al tiempo de incubación y a la extracción o no de los sulfatos a medida que éstos van siendo liberados a partir del S orgánico del suelo (denominadas en consecuencia incubaciones abiertas y cerradas, respectivamente). Otras diferencias se basan en la temperatura y humedad elegidas para la incubación, y en las condiciones aeróbicas o anaeróbicas en que las mismas se realizan. Cualquiera sea la metodología utilizada, debería cumplir algunos requisitos para ser utilizada como un criterio práctico de recomendación, a saber:

- Basarse en una técnica lo suficientemente ágil y sencilla como para ser reproducida en un laboratorio comercial.
- Tener bajo costo para permitir su adopción generalizada.
- Disponer de los resultados en un tiempo suficientemente breve, que permita planificar la fertilización sin tener para ello que tomar las muestras de suelo bajo condiciones ambientales muy diferentes a las que se presentarán al momento de realizar la siembra y aplicar los fertilizantes.

Estos estudios no tienen como finalidad cuantificar el S efectivamente mineralizado durante el ciclo o parte del ciclo de la Soja, sino tratar de establecer una buena correlación entre un índice que diferencie la capacidad de los diferentes suelos para mineralizar S y la respuesta a la fertilización con este nutriente.

El objetivo de este capítulo fue establecer las relaciones existentes entre diferentes variables de suelo y la respuesta de la Soja a la fertilización azufrada.

2- MATERIALES Y MÉTODOS

2.a- ANÁLISIS DE SUELOS AL MOMENTO DE LA SIEMBRA

En todos los experimentos se realizó un muestreo inicial del suelo al momento de la siembra, tomándose muestras compuestas por bloque, a tres profundidades: 0-20, 20-40 y 40-60 cm. En algunos casos (7 sitios en total), sin embargo, se tomó una sola muestra compuesta por ensayo (sin tener en cuenta los bloques) para cada una de las tres profundidades mencionadas. Las muestras superficiales (0-20 cm) estuvieron compuestas por 20 submuestras, y las más profundas (20-40 y 40-60 cm) se integraron con 10 a 20 submuestras. Los análisis realizados sobre las muestras de 0-20 cm con objetivos de diagnóstico fueron: MO (Walkley y Black, 1934) y S-sulfatos [extracción por acetato de amonio, determinación por turbidimetría (Lisle et al, 1994)]. En las muestras de mayor profundidad se midió también el contenido de S-sulfatos [acetato de amonio y turbidimetría]. Para la mayor parte de los sitios experimentales, se consideró el fraccionamiento textural del horizonte A especificado en las cartas de suelo elaboradas por INTA. En 8 ensayos del primer año y en cuatro del segundo la caracterización textural se realizó en laboratorio [método de la pipeta de Robinson (Gee y Bauder, 1986)], debido a que los datos no fueron informados, o a que el sitio experimental no ha sido relevado a un nivel de detalle que permita la identificación de la respectiva serie de suelo. Con los valores de las fracciones granulométricas así obtenidas se calcularon las relaciones MO/arcilla, MO/limo y MO/(arcilla + limo). Las muestras de suelo fueron secadas en estufa de circulación forzada a 42 °C, molidas en un molino de martillos tipo Willey y

tamizadas por malla < 2mm, a excepción de un reducido grupo de muestras que fueron enviadas al laboratorio de análisis secadas, molidas y tamizadas por los propios investigadores.

2.b- EVALUACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE S BASADA EN INCUBACIONES DE SUELOS

Con el objetivo de realizar una evaluación directa de la mineralización de S a partir de la fracción orgánica del suelo, durante el primer año se realizaron incubaciones de muestras superficiales (0-20 cm) en condiciones controladas de temperatura y humedad. Para dichas incubaciones se seleccionaron las muestras de suelo provenientes de 12 ensayos, elegidos por el bajo coeficiente de variación que presentaron en sus rendimientos (< 10 %), como así también por la amplia variabilidad en la textura de los suelos y en su ubicación geográfica. Este grupo comprendía asimismo un número equilibrado de ensayos con respuesta positiva y nula a la fertilización con S. El ensayo Marcos Juárez I-1 fue incluido por ser el sitio de la provincia de Córdoba con mayor diferencia positiva por el agregado de S, aunque esta respuesta no fuese significativa y el coeficiente de variación alcanzara al 14,46 % (Tabla 12). De cada uno de los sitios seleccionados, se incubó una submuestra de 20 g de suelo por bloque, correspondiente a una fracción del total de la muestra extraída al momento de la siembra. Previamente, se realizó en ellas una determinación inicial de la concentración de sulfatos, utilizando como extractante una solución de fosfato diácido de Potasio y la cuantificación de S-sulfatos en el extracto por turbidimetría (Lisle et al, 1994). Mediante este extractante se puede valorar el S-sulfatos en solución, el adsorbido

y parte de la fracción orgánica lábil (Jones, 1986; Sillem, 1998). El extractante utilizado fue diferente del que se empleó para realizar los análisis a la siembra. Esto se debió a que en el laboratorio en el que se realizaron los análisis al momento de la siembra no se contaba con un incubador que permitiera mantener constante la temperatura de las muestras. Por este motivo, las incubaciones se debieron realizar en otro laboratorio, el cual utilizaba como extractante de rutina para S al fosfato diácido de Potasio.

Sobre cada muestra de suelo, la extracción y el dosaje de S se realizó por triplicado. El suelo fue rehumedecido con agua destilada a 80 % de capacidad de campo, tal como sugieren Maynard et al, (1983), teniendo en cuenta la textura de la serie de suelos de cada ensayo, y perfectamente homogeneizado. Para establecer la cantidad de agua a agregar se tomó como referencia el contenido de humedad necesario para alcanzar la capacidad de campo, determinado en muestras de suelo de similar composición textural a las que iban a ser incubadas, y sobre este valor se calculó el 80 %. Para la incubación se utilizaron recipientes cilíndricos de plástico estéril resistente al calor con tapa a rosca y de un volumen de 100 ml. Los recipientes conteniendo las respectivas muestras de suelo fueron cerrados e incubados por 14 días, en un incubador que mantenía la temperatura constante a 30 °C a través de un termostato. Este período de tiempo sería el máximo que podría extenderse una incubación cerrada sin que los sulfatos liberados a partir de la MO inhiban la mineralización por producto (Maynard et al., 1983). Por otra parte, se eligió una temperatura relativamente alta para aumentar las tasas de mineralización y expandir las diferencias entre suelos

(Tabatabai y Al-Khafaji, 1980). A los 7 días de iniciada la incubación, los recipientes con las muestras fueron destapados durante 15 minutos para permitir la aireación de los suelos, evitando así condiciones de anaerobiosis (R. Alvarez, comunicación personal). Luego de transcurrido el período de incubación, las muestras se secaron en estufa de circulación forzada a 42 °C y se analizaron para sulfatos utilizando idéntica metodología a la empleada en la determinación inicial.

2.c- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS Y CÁLCULO DE LA RESPUESTA A S

Para estudiar la asociación entre variables de suelo y la expresión de la respuesta a S se utilizaron procedimientos de regresión lineal simple y regresión lineal múltiple (procedimiento Stepwise y análisis de multicolinealidad), por medio del programa estadístico Statistix 7. En el procedimiento Stepwise se evaluaron valores de significancia estadística de entrada y salida de variables de $\alpha=0,05$ y $0,10$. Cuando no se pudo establecer asociación entre la respuesta a la fertilización azufrada y una variable en particular a través de regresión, se intentó una separación de dos poblaciones (ensayos con y sin respuesta a S) por medio de una adaptación del método de los cuadrantes de Cate y Nelson (Cate y Nelson, 1965).

Los rendimiento de grano de cada ensayo fueron sometidos a análisis de varianza mediante el programa Statistix 7, y, en caso de detectarse efecto significativo de tratamiento ($P<0,10$), se realizaron comparaciones de medias a través del test LSD ($\alpha=0,10$). El nivel de significancia fue elegido considerando que es adecuado tomar la decisión de fertilizar un cultivo de Soja aún cuando

existe un 10 % de probabilidad de no encontrar una respuesta positiva a esta práctica. En todos los casos, la variable dependiente en estos análisis fue la respuesta en rendimiento de grano al agregado de S. La expresión de dicha respuesta en forma de rendimientos relativos al testigo no mejoró el ajuste de las variables ni permitió generar un modelo de mayor poder predictivo (datos no presentados). Si para el análisis de varianza de los rendimientos se elimina el tratamiento 4 (**T4**), el diseño toma la forma de un factorial y se puede calcular la interacción P x S. Esta interacción no fue estadísticamente significativa ($P=0,10$) en 25 de los 29 ensayos de la primera campaña (2000/01). Durante el segundo año de ensayos (2001/02), y tomando el mismo nivel de significancia, la interacción P x S no fue estadísticamente significativa en 16 de los 17 ensayos realizados. Algunos autores han mencionado mayores posibilidades de respuesta al S cuando se han cubierto los requerimientos de P (Darwich, 1998, 1999). Sin embargo, la interacción entre ambos nutrientes suele ser difícil de demostrar en condiciones de campo, más aún con niveles discretos de respuesta, y no pudo verificarse en la mayoría de los ensayos de esta red. Dos de los ensayos con interacción PxS estadísticamente significativa fueron eliminados del análisis (ver **3.a.2** y **3.b.2** de este capítulo). En los tres restantes, alguno de los tratamientos fertilizados presentó un rendimiento menor respecto de su testigo, sin que esto tuviera explicación aparente. Para atenuar los desvíos resultantes de este comportamiento sin eliminar tratamientos dentro de un ensayo, se procedió a calcular la respuesta de la misma manera que en los sitios sin interacción PxS, es decir como un

promedio de las diferencias entre los tratamientos que recibieron S y aquellos que no lo recibieron en ambas situaciones de fertilización con P:

$$\text{Respuesta a S} = [(T2-T0) + (T3-T1)]/2$$

3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.a- ENSAYOS CAMPAÑA 2000/01

3.a.1- RESULTADOS GENERALES DE LA RED: RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN AZUFRADA EN SOJA

Los rendimientos promedios de cada uno de los ensayos de la campaña 2000/01, así como la respuesta media a S (calculada como se detalla en el punto 2.c de este capítulo) y su significancia estadística, se describen en la Tabla 12.

Tabla 12- Rendimiento de grano, significancia estadística, coeficiente de variación (C.V.) y respuesta media a la fertilización con S. Ensayos campaña 2000/01. Los rendimientos son promedio de cuatro repeticiones (tres en Pergamino I-1, Maracó, Catriló I-1, Catriló I-2 y Capital I-1). Respuesta a S = $[(T2-T0) + (T3-T1)]/2$. Para un mismo sitio, los rendimientos seguidos de diferentes letras difieren significativamente (LSD, $\alpha=0,10$).

Partido/ Departamento	Rendimiento (kg ha ⁻¹)					Anova P > F	C.V. (%)	Resp S (kg ha ⁻¹)
	T0	T1	T2	T3	T4			
1. San Jerónimo I-1	3077 d	3543 b	3379 c	3703 a	3626 ab	0,0000	3,11	231
2. Las Colonias	2655 c	3119 b	3019 b	3308 a	3272 a	0,0000	3,81	277
3. Belgrano I-1	3782 c	4011 b	4224 a	4197 ab	4125 ab	0,0092	3,75	314
4. Paraná I-1	2789	2907	2709	2801	3042	0,1294	6,06	-93,1
5. Paraná I-2	2592	2901	2475	2632	2544	0,5516	13,97	-193
6. Río Cuarto I-1	919	1076	1016	996	993	0,6841	14,76	9
7. Marcos Juárez I-1	2397	2512	2802	2710	2784	0,5083	14,46	302
8. Marcos Juárez I-2	3831	3721	3835	3533	3306	0,2272	9,66	-92
9. Iriondo	4512	4420	4535	4466	4543	0,5130	2,48	35
10. Caseros	3631 b	3631 b	3666 b	3772 a	3772 a	0,0261	2,02	88
11. General López	3495	3690	3579	3777	3610	0,1552	4,18	86
12. Colón I-1	3370	3684	3583	3666	3715	0,5602	8,77	98
13. Pergamino I-1	4117	4025	3965	4003	4037	0,9928	10,13	-87
14. Pergamino I-2	3536	3550	3350	3596	3832	0,2255	7,52	-70

(continúa...)

Tabla 12- (continuación)

Partido/ Departamento	Rendimientos (kg ha ⁻¹)					Anova P > F	C.V. (%)	Resp S (kg ha ⁻¹)
	T0	T1	T2	T3	T4			
15. S. A. de Areco I-1	3550	3500	3125	3608	3675	0,8460	21,14	-158
16. S. A. de Areco I-2	3209	3342	3250	3900	3400	0,1915	12,11	300
17. Rojas	4042	4045	4071	4108	4193	0,1787	2,23	46
18. Junín I-1	2397 b	2930 a	2562 b	3112 a	3189 a	0,0012	8,05	174
19. Junín I-2	2591 c	3227 a	2763 c	3042 ab	2853 bc	0,0089	7,22	-7
20. 9 de Julio I-1	4066 c	4527 a	4464 ab	4174 bc	4469 ab	0,0631	5,49	23
21. 9 de Julio I-2	3498	3614	3178	3682	3487	0,1374	7,05	-126
22. Tandil I-1	2622 b	3110 a	2501 b	2964 a	3039 a	0,0019	5,78	-134
23. Tandil I-2	2612 ab	2811 a	2360 b	2856 a	2784 a	0,0320	7,34	-103
24. Rivadavia	3963	4090	3927	4050	4081	0,1770	3,96	-39
25. Trenque Lauquen	3582	3520	3665	3376	3110	0,3167	9,42	-30
26. Maracó	596	629	647	709	558	0,8565	5,01	65
27. Catriló I-1	3623	3314	3166	4028	3105	0,1026	63,20	129
28. Catriló I-2	3565 a	3032 b	3472 ab	3910 a	3753 a	0,0967	9,92	393
29. Capital I-1	3266	3683	3454	3719	3630	0,9145	19,20	112

Durante el primer año de ensayos se registraron aumentos significativos de rendimiento ($P < 0,10$) debido al agregado de S en seis de los sitios evaluados. En dos casos correspondieron a diferencias entre los tratamientos T3 y T1, en otros dos surge de comparar T2 vs T0, y en los dos restantes se observaron incrementos significativos de rendimiento en ambas comparaciones. Como ya se mencionara en el punto **2.c**, la respuesta a la aplicación de S se mostró mayoritariamente independiente de la fertilización con P.

Analizando la respuesta promedio, puede apreciarse que en seis sitios el agregado de S incrementó los rendimientos en más de 200 kg ha^{-1} , y en cuatro de ellos el aumento fue superior a 300 kg ha^{-1} . Claramente, se observa un predominio de sitios de no respuesta (respuestas inferiores a 200 kg ha^{-1} o aún negativas) a la fertilización azufrada. El mayor número de ensayos con respuesta positiva se observó en el centro-sur de Santa Fe, precisamente donde se reportaron los primeros resultados favorables debido a esta práctica (Martínez y Cordone, 1998). Cuatro de los seis experimentos realizados en dicha provincia mostraron diferencias significativas ($P < 0,10$) a favor de los tratamientos fertilizados.

En la Figura 7 se presenta la respuesta media a S sin agregado de P (Figura 7.a) o con fertilización fosfatada de base (Figura 7.b), con sus respectivas desviaciones estándar.

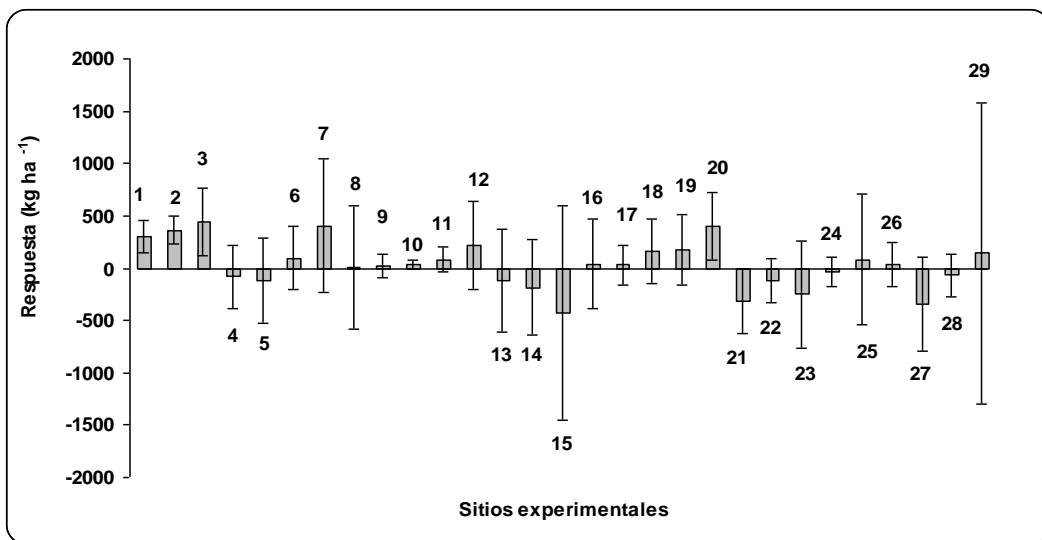


Figura 7.a.

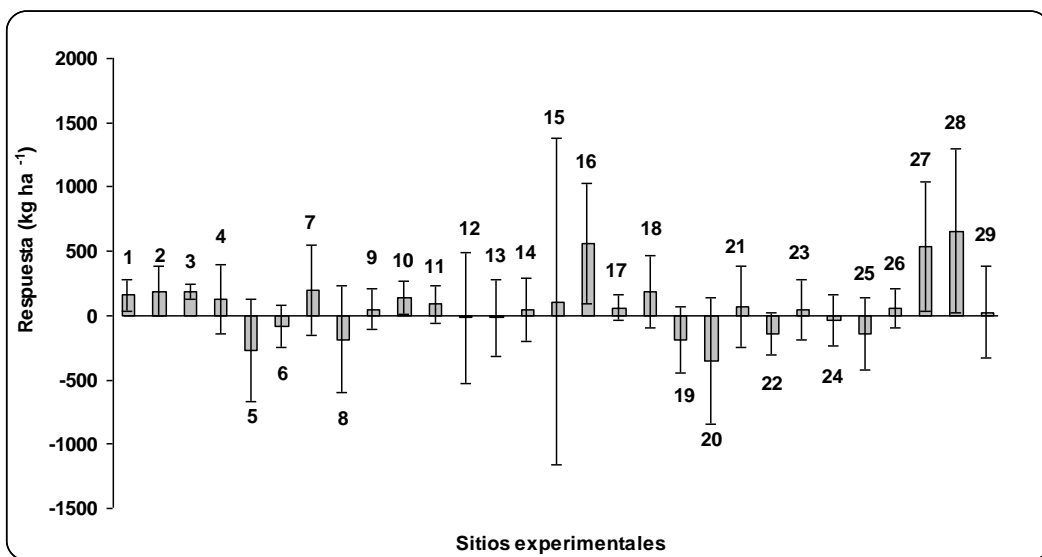


Figura 7.b.

Figura 7- Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera sin agregado de P (a) o con agregado de P (b). Ensayos campaña 2000/01. Los números corresponden a los sitios presentados en la Tabla 1. Las barras grafican la respuesta media y las líneas verticales representan la desviación estándar respecto de la media.

Puede visualizarse la escasa respuesta a S verificada en esta red. Comparando los tratamientos sin fertilización fosforada de base (Figura 7.a), sólo en cuatro sitios (San Jerónimo I-1, Las Colonias, Belgrano I-1 y 9 de Julio I-1) las respuestas medias positivas (Respuesta sin P = Rendimiento T2-Rendimiento T0), superaron a la desviación estándar de la muestra (las líneas de dispersión no cruzan el valor de cero respuesta). Cuando se consideran los tratamientos con agregado de P (Figura 7.b), en 6 ensayos (San Jerónimo I-1, Belgrano I-1, Caseros, San Antonio de Areco I-2, Catriló I-1 y Catriló I-2) las respuestas medias (Respuesta sin P = Rendimiento T2-Rendimiento T0) superaron a los desvíos estándar. La escasa frecuencia y magnitud de la respuesta a la fertilización con S observada en esta red fue la principal limitación para la evaluación de las herramientas de diagnóstico probadas.

3.a.2- PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA A S EN BASE A VARIABLES DE MANEJO

Para el análisis de los datos de la campaña 2000/01, se excluyeron los sitios Río Cuarto I-1 (afectado por una intensa sequía) y Maracó (dañado por granizo), ambos con niveles muy bajos de productividad (Tabla 12). Tampoco fue considerado el ensayo Catriló I-1 debido a la magnitud del error experimental observado en la evaluación de rendimiento (C.V.=63,2 %).

Los análisis realizados a través de ANOVA de una vía, utilizando como categóricas a distintas variables de manejo, determinaron que no hubieron diferencias de respuesta determinadas por el cultivo antecesor (P=0,76), el sistema de labranza (P=0,84) (Tabla 3) o la variedad utilizada (P=0,57) (Tabla 5).

Tampoco hubo relación de la respuesta a S con los años de agricultura continua desde la última pradera (Tabla 3), tal como se muestra en la Figura 8. Esta variable tiene como desventaja su ambigüedad y dudosa precisión. La información sobre la historia agrícola de los lotes fue proporcionada por los mismos productores, y pocos de ellos registran la secuencia de cultivos de sus establecimientos, debiendo por consiguiente apelar a la memoria. La incertidumbre es aún mayor cuando se trata de lotes con un extenso período bajo agricultura, y en los campos en alquiler donde la tenencia del mismo frecuentemente cambia a través de los años.

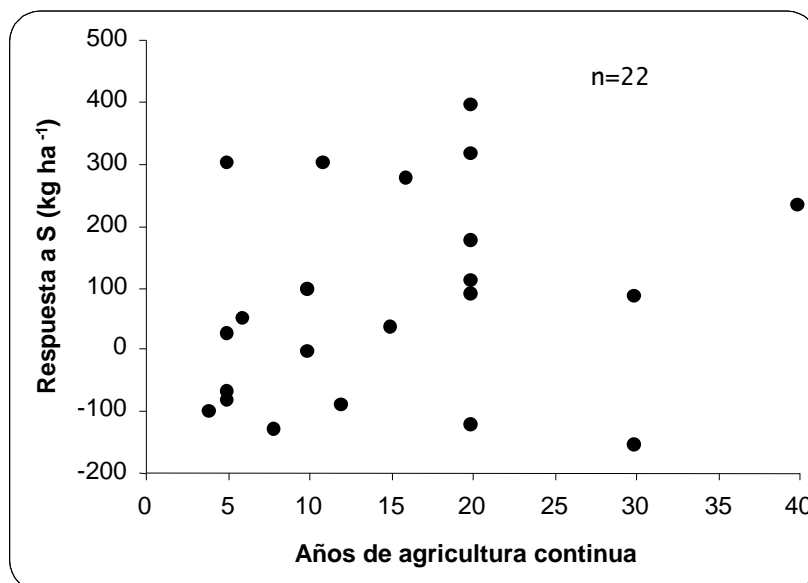


Figura 8- Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera en función de los años de agricultura continua desde la última pradera. Ensayos campaña 2000/01. Los datos de la historia agrícola de los sitios fueron suministrados por los propios productores. Se presenta la información proveniente de 22 sitios: se eliminaron del análisis los ensayos Río Cuarto I-1, Maracó y Catriló I-1 (ver punto 3.a.2), y a estos se le suman los cuatro sitios sin información de años de agricultura (Tabla 3).

3.a.3- PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA A S EN BASE A PARÁMETROS DE SUELO EVALUADOS A LA SIEMBRA

La Tabla 13 muestra los datos de las variables de suelo que fueron evaluadas con el objetivo de predecir la respuesta a S en cada uno de los ensayos de la campaña 2000/01.

Tabla 13- Variables de suelo evaluadas a la siembra con objetivo de diagnóstico de la fertilidad azufrada en Soja de primera.

Ensayos campaña 2000/01. Los valores presentados son promedio de las repeticiones de cada ensayo.

Partido/ Departamento	MO (%)	S-SO ₄ ²⁻ 0-20 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 20-40 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 40-60 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 0-40 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 0-60 cm (mg kg ⁻¹)	Arcilla (%)	Limo (%)	MO/arcilla	MO/(arcilla + limo)
1. San Jerónimo I-1	2,84	11,30	10,10	10,10	10,70	10,50	25,00	72,50	0,144	0,029
2. Las Colonias	2,26	14,70	9,30	9,40	12,00	11,13	28,70	66,70	0,079	0,024
3. Belgrano I-1	2,98	10,20	8,10	8,90	9,15	9,07	26,54	70,52	0,112	0,031
4. Paraná I-1	3,20	14,10	13,00	13,80	13,55	13,63	47,70 (**)	49,70 (**)	0,067	0,033
5. Paraná I-2	2,68	10,80	13,40	21,30	12,10	15,17	43,60 (**)	49,90 (**)	0,061	0,029
6. Río Cuarto I-1 (*)	2,67	12,60	12,50	9,90	12,55	11,67	14,00	38,00	0,191	0,051
7. Marcos Juárez I-1	2,84	8,90	7,30	8,50	8,10	8,23	25,70	69,77	0,111	0,030
8. Marcos Juárez I-2	2,84	10,20	8,90	7,90	9,55	9,00	25,70	69,77	0,111	0,030
9. Iriondo	2,66	11,00	9,40	9,80	10,20	10,07	25,70	69,72	0,104	0,028
10. Caseros	2,94	10,63	9,40	10,25	10,01	10,09	20,77	69,36	0,142	0,033
11. General López	3,16	10,00	8,10	7,40	9,05	8,50	25,40	61,75	0,124	0,036
12. Colón I-1	3,32	10,60	9,80	8,90	10,20	9,77	23,18	48,49	0,143	0,046
13. Pergamino I-1	3,14	11,80	12,50	13,70	12,15	12,67	22,74	64,91	0,138	0,036
14. Pergamino I-2	2,44	10,10	10,30	9,90	10,20	10,10	22,74	64,91	0,107	0,028
15. S. A. de Areco I-1	3,50	10,90	no evaluado	no evaluado	no evaluados	no evaluado	26,60	57,46	0,132	0,042
16. S. A. de Areco I-2	3,95	8,00	8,90	8,60	8,45	8,50	26,60	57,46	0,148	0,047
17. Rojas	3,14	12,80	10,40	10,40	11,60	11,20	23,18	48,49	0,135	0,044

(continúa...)

Tabla 13- (continuación)

Partido/ Departamento	MO (%)	S-SO4 0-20 cm (mg kg⁻¹)	S-SO4 20-40 cm (mg kg⁻¹)	S-SO4 40-60 cm (mg kg⁻¹)	S-SO4²⁻ 0-40 cm (mg kg⁻¹)	S-SO4 0-60 cm (mg kg⁻¹)	Arcilla (%)	Limo (%)	MO/arcilla	MO/(arcilla + limo)
18. Junín I-1	1,90	10,40	11,30	10,70	10,85	10,80	15,42	26,04	0,123	0,046
19. Junín I-2	2,70	11,90	14,20	12,20	9,80	12,77	18,80	43,60	0,144	0,043
20. 9 de Julio I-1	3,35	9,90	9,70	8,40	9,30	9,33	14,70	29,20	0,228	0,076
21. 9 de Julio I-2	4,05	9,80	8,80	9,80	13,05	9,47	14,20	23,50	0,285	0,107
22. Tandil I-1	5,84	13,20	12,50	13,10	12,85	12,93	29,40	41,80	0,199	0,082
23. Tandil I-2	6,49	13,40	10,10	12,20	11,75	11,90	29,40	41,80	0,221	0,091
24. Rivadavia	1,90	7,80	7,40	11,80	7,60	9,00	8,90 (**)	22,31 (**)	0,213	0,061
25. Trenque Lauquen	2,62	9,10	9,20	8,10	9,15	8,80	13,00 (**)	6,90 (**)	0,202	0,132
26. Maracó (*)	1,10	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	7,00 (**)	17,64 (**)	0,157	0,045
27. Catriló I-1 (*)	1,95	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	15,44 (**)	41,64 (**)	0,126	0,034
28. Catriló I-2	1,51	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	8,90 (**)	3,56 (**)	0,170	0,121
29. Capital I-1	2,82	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	16,44 (**)	40,64 (**)	0,172	0,049

(*) Ensayos no considerados en la evaluación de herramientas de diagnóstico. (**) Determinado en laboratorio.

En la Figura 9 se presentan las relaciones encontradas entre la respuesta a la fertilización azufrada y las diferentes variables de suelo evaluadas.

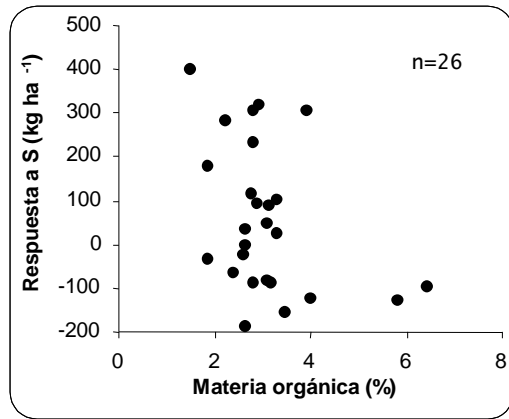


Figura 9.a

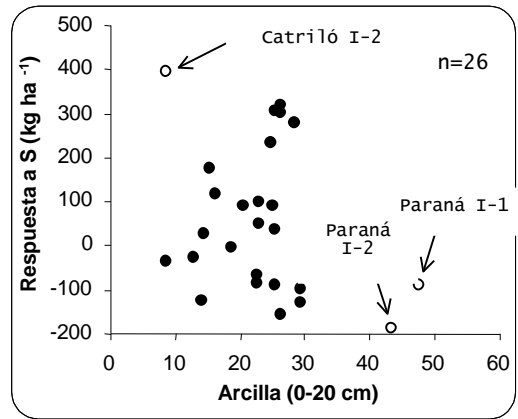


Figura 9.b

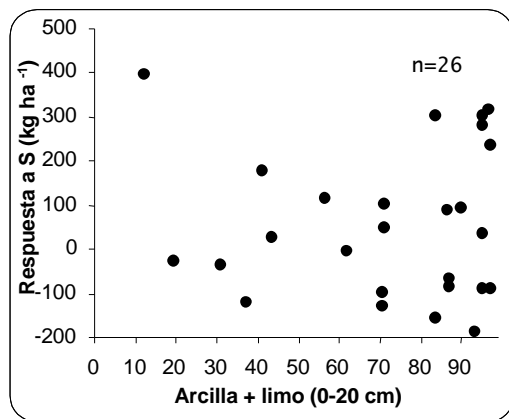


Figura 9.c

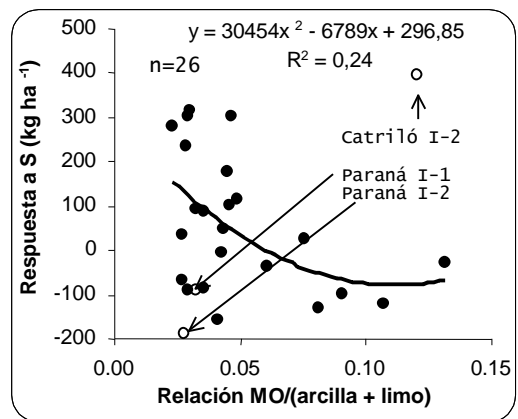


Figura 9.d

(continúa...)

Figura 9- (continuación)

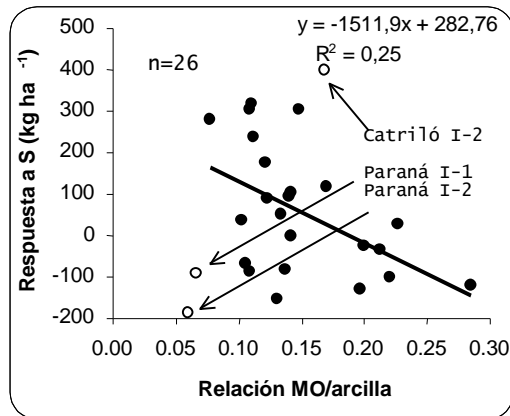


Figura 9.e

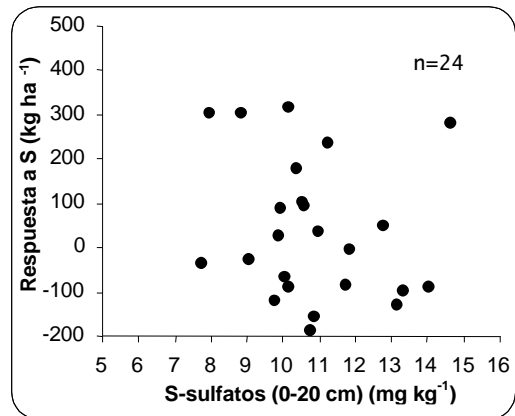


Figura 9.f

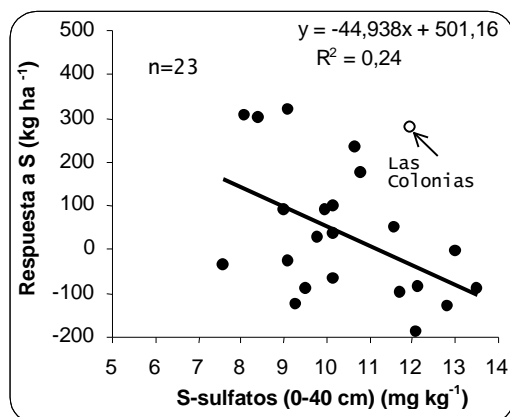


Figura 9.g

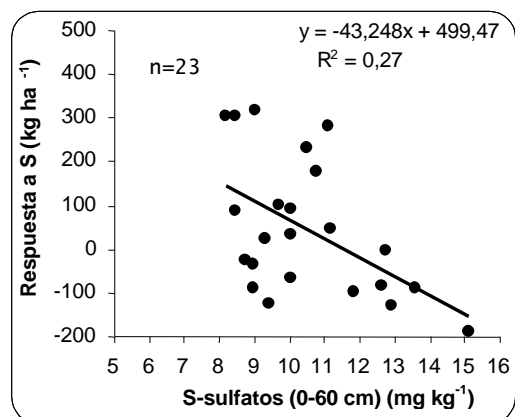


Figura 9.h

Figura 9- Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera en función de parámetros de suelo evaluados a la siembra. Ensayos campaña 2000/01.

Los círculos vacíos indican sitios no considerados en el análisis.

Ninguna variable de suelo por sí sola logró explicar en forma satisfactoria la respuesta a S. En un área muy amplia y con diversidad textural como la abarcada por esta red de ensayos, el tenor de MO no refleja solamente el nivel de degradación y la capacidad de suministrar nutrientes del suelo, sino también su

composición textural. Esto sucede porque las arcillas y en menor medida el limo ejercen una protección física y química sobre la MO del suelo, retardando su descomposición (Alvarez y Lavado, 1998; Galantini et al., 2002). Como consecuencia de ello, la MO no fue un indicador apropiado para predecir la respuesta a S (Figura 9.a), a pesar de la importancia de las fracciones orgánicas en la dinámica de este nutriente. Por otro lado, la textura (porcentajes de arcilla y de arcilla + limo) tampoco permitió anticipar satisfactoriamente la respuesta a la fertilización azufrada en Soja (Figuras 9.b y 9.c). Aún cuando parece haber una tendencia general a aumentar la respuesta con la disminución del porcentaje de arcilla, esta asociación fue débil y claramente dominada por dos sitios de textura muy fina (Paraná I-1 y Paraná I-2), y un sitio muy arenoso y de alta respuesta (Catriló I-2). Descartando estos tres ensayos (círculos vacíos, Figura 9.b), no se observó ninguna tendencia definida. La explicación a esta falta de relación residiría en que si bien la abundancia de material fino ha sido asociada con un incremento en la MO, y con ello en el S total, no se ha observado sin embargo asociación entre la textura y la MO joven, que es la fracción más activa en la dinámica de los nutrientes (Galantini et al., 2002). En otros países, como EEUU, se recomienda la fertilización con S en suelos arenosos (Johnson, 1987); no obstante, en Argentina se han informado numerosos ejemplos de respuesta sobre suelos que no poseían esta condición textural (Martínez y Cordone, 1998, 2000; Melgar y Gearhart, 2000).

El contenido de MO ajustado por textura podría representar una estimación rápida y aceptable de la MO joven, fácilmente mineralizable, cuya determinación

es más compleja y no realizada como rutina en los laboratorios comerciales. En esta red, la relación $MO/(arcilla + limo)$ no logró predecir adecuadamente la respuesta a S, aunque retirando del análisis los mismos tres sitios que se eliminaron en la Figura 9.a, se observó una débil tendencia cuadrática a disminuir la respuesta con el aumento de esta relación (Figura 9.d). Más apropiada parecería ser la relación $MO/arcilla$, la que pudo ser ajustada mediante una ecuación lineal (Figura 9.f) y requiere la determinación de una variable menos (contenido de limo), aunque después de descartar los tres ensayos antes mencionados sólo se logró explicar un 25 % de la respuesta a S.

La disponibilidad de S-sulfatos en superficie (0-20 cm), el parámetro más comúnmente evaluado con objetivos de diagnóstico, no permitió explicar la respuesta a S (Figura 9.f). Los sulfatos son móviles en el suelo y, por lo tanto, en períodos lluviosos pueden acumularse en los horizontes subsuperficiales. Bajo dichas condiciones, sería esperable lograr mejores asociaciones cuando la determinación de sulfatos alcanza a estratos más profundos del suelo. Probablemente por este motivo, se obtuvo un ajuste levemente mejor cuando la evaluación se realizó hasta los 40 cm (Figura 9.g), luego de retirar del análisis el sitio Las Colonias, el cual puede considerarse como un “outlier” (valor residual estudentizado mayor a dos) para esta variable. De acuerdo con este razonamiento, la disponibilidad de S-sulfatos en el espesor 0-60 cm fue el parámetro de suelo que mejor explicó la respuesta a la fertilización azufrada en Soja, en forma significativa y sin puntos fuera de tendencia, aunque sin el ajuste necesario como para basar un criterio de recomendación en esta única variable (Figura 9.h). El

estrecho rango en la disponibilidad de S-sulfatos observado en todas las profundidades evaluadas, y la relativa precisión de la determinación de los mismos por turbidimetría en el extracto de suelo, sumado a la dificultad de evaluar un nutriente móvil en el perfil y con una dinámica muy asociada al ciclo de la MO, explicarían, al menos en parte, la debilidad de estas estimaciones.

Utilizando el procedimiento Stepwise (tanto para un valor $\alpha=0,10$ como $\alpha=0,05$) en el ámbito de toda la red, la relación MO/arcilla y la disponibilidad de S-sulfatos (0-60 cm) fueron los parámetros seleccionados. Las variables evaluadas incluyeron a todas aquellas presentadas en la Figura 9, a las que se les sumó también la relación MO/limo. Descartando en sucesivas aproximaciones los sitios fuera de tendencia (valor residual estudentizado mayor a dos), se logró explicar el 70 % de la respuesta a S. Los resultados de las iteraciones se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14- Modelos de regresión seleccionados para explicar la respuesta a S en Soja de primera. Procedimiento Stepwise ($P=0,10$). Ensayos campaña 2000/01.

Modelo	n	Coefficiente de determinación (R^2)	Sig. est. (P)	Sitios con VRE > 2
Resp=819 – 1357 MO/arcilla – 55 S-sulfatos (0-60 cm)	23	0,48	0,0009	Marcos Juárez I-2
Resp=948 – 1578 MO/arcilla – 63 S-sulfatos (0-60 cm)	22	0,62	0,0001	Pergamino I-2
Resp=1017 – 1742 MO/arcilla – 66 S-sulfatos (0-60 cm)	21	0,70	0,0000	-----

n: número de sitios incluidos en el modelo.

Sig. est.: Nivel de significancia estadística del modelo propuesto.

VRE: Valor residual estudentizado del ensayo individual respecto del modelo propuesto. En las sucesivas iteraciones se excluyeron aquellos ensayos cuyos valor residual estudentizado fue mayor a dos.

Además de los tres sitios desestimados desde un principio por su muy baja productividad (Río Cuarto I-1, Maracó y Catriló I-1), en el análisis de la Tabla 14 se excluyeron también los ensayos San Antonio de Areco I-1, Catriló I-2 y Capital I-1, por no disponerse de los valores de S-sulfatos hasta los 60 cm de profundidad.

Los modelos seleccionados tienen sentido biológico, ya que S-sulfatos (0-60 cm) expresa la disponibilidad inicial del nutriente en el suelo, y la relación MO/arcilla representaría una estimación indirecta de la capacidad para mineralizarlo, teniendo en cuenta que más del 95 % del S del suelo se encuentra en forma orgánica (Ericksen, 1997 *a*; Galantini et al., 2002) y que la arcilla podría ejercer un efecto protector sobre este S orgánico, impidiendo o retardando su

pasaje a formas disponibles. Ambas variables pueden integrarse en un modelo aditivo dado que no están correlacionadas entre sí ($r=0,33$; $P=0,14$ para el último modelo propuesto en la Tabla 14 [$n=21$]).

3.a.4- ESTUDIOS DIRECTOS DE MINERALIZACIÓN: INCUBACIONES DE SUELO

En la Tabla 15 se presentan los valores de S-sulfatos mineralizados en las incubaciones de suelos (S-inc).

Tabla 15- *S-sulfatos inicial, S-sulfatos final y S-sulfatos mineralizados (S-inc) en incubaciones controladas de muestras superficiales (0-20 cm) de suelo. Doce sitios de todo el país, seleccionados por su bajo error experimental, variabilidad textural y respuesta diferencial a la fertilización azufrada. Campaña 2000/01.*

Partido/ Departamento	S-sulfatos inicial (mg kg ⁻¹)	S-sulfatos final (mg kg ⁻¹)	S-inc (final-inicial) (mg kg ⁻¹)
1. San Jerónimo I-1	6	27	21
2. Las Colonias	13	32	19
3. Belgrano I-1	10	17	7
4. Paraná I-1	5	6	1
7. Marcos Juárez I-1	8	20	12
11. General López	6	23	17
12. Colón I-1	7	20	13
18. Junín I-1	5	14	9
19. Junín I-2	6	22	16
21. 9 de Julio I-2	7	26	19
22. Tandil I-1	8	47	39
23. Tandil I-2	13	45	32

En forma consistente con las estimaciones indirectas de la capacidad de mineralización de S (Relación MO/arcilla), la medición directa del proceso a

través de incubaciones de suelos mostró un buen ajuste con la respuesta a la fertilización. Retirando del análisis uno de los 12 sitios evaluados (Paraná I-1), el cual corresponde a un suelo con elevado contenido de arcillas (Tabla 13) y por este motivo de alta capacidad de fijación, hecho que podría haber provocado un comportamiento diferencial respecto a la mineralización de S (Figura 10.a), se observa una adecuada asociación ($R^2 = 0,56$) entre S-inc y la respuesta al nutriente (Figura 10.b).

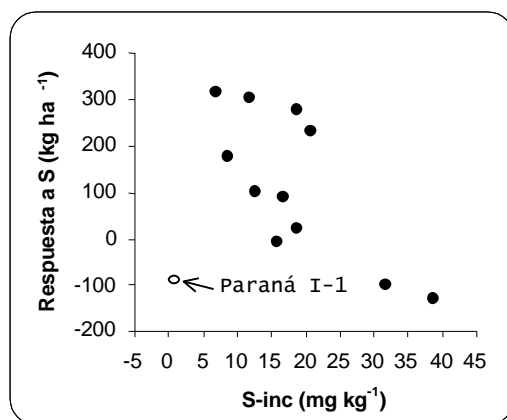


Figura 10.a

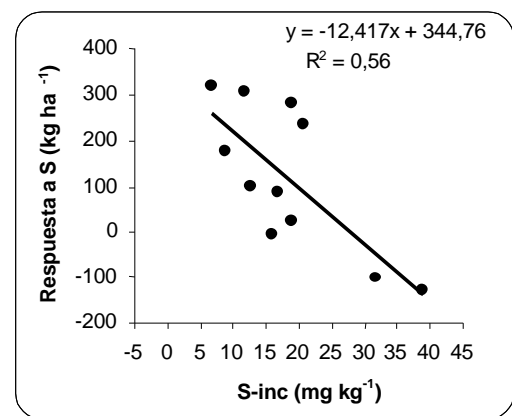


Figura 10.b

Figura 10- *Relación entre la respuesta al agregado de S y la concentración de S-sulfatos mineralizados por incubaciones de muestras superficiales de suelo (S-inc). Campaña 2000/01. Figura 10.a: incluye el sitio Paraná I-1; Figura 10.b: ajuste luego de retirar del análisis al sitio Paraná I-1.*

Sin embargo, debe mencionarse que la tendencia lineal presentada está marcadamente influenciada por dos puntos, correspondientes a los sitios Tandil I-1 y Tandil I-2, que ejercen un fuerte efecto de “palanca” (leverage) sobre la pendiente de la recta de regresión. Aún con esta salvedad, cabe destacar que las incubaciones de suelo lograron expandir notablemente el rango de la variable

regresora (7-39 mg kg⁻¹ de S-inc, excluyendo el ensayo Paraná I-1) en comparación con la determinación inicial de S-sulfatos (rango: 7,8-14,7 mg kg⁻¹ S-sulfatos [0-20 cm] a la siembra). Para que una variable regresora pueda ser utilizada como base de un método de diagnóstico, es necesario que abarque un rango suficientemente amplio. En caso contrario, sería dificultoso establecer umbrales críticos para identificar sitios con y sin probabilidades de respuesta, los que tendrían valores muy similares entre sí. Diversos autores han reportado valores de mineralización de S-sulfatos inferiores a los presentados en la Tabla 15. Así, Tabatabai y Bremner (1972), trabajando con muestras de suelo de Iowa (EEUU) encontraron inmovilización de S-sulfatos en incubaciones de dos semanas, y, luego de un período de 6 semanas, un máximo de 6 mg kg⁻¹ de S-sulfatos mineralizados. Por su parte, Maynard et al. (1983) observaron un balance de mineralización-inmovilización prácticamente neutro luego de 17 semanas, y Tabatabai y Al-Khafaji (1980) determinaron una mineralización de S-sulfatos que no superaba el 30 % de la disponibilidad inicial, luego de un período de dos semanas de incubación. La diferencia existente entre los valores determinados en esta experiencia y los informados en la bibliografía, originan la necesidad de seguir estudiando la utilidad de esta herramienta, tanto en su valor predictivo de la respuesta a S como en la capacidad para crear un amplio rango de valores que posibilite diferenciar la capacidad de mineralización de diferentes suelos.

La variable S-inc mostró correlaciones significativas con otras variables como MO ($r=0,84$; $P=0,001$) y MO/arcilla ($r=0,62$; $P=0,04$) (ver Tabla 17 en el punto 3.a.5 de este capítulo), lo cual demostraría la validez de considerar a todas

ellas como estimadores de un mismo proceso, la capacidad del suelo para mineralizar S. Desde el punto de vista operativo, las incubaciones de suelo constituyen una práctica relativamente poco costosa y fácil de reproducir en laboratorio, y por lo tanto potencialmente aptas para ser desarrolladas como un método de diagnóstico. Adicionalmente, la obtención de la muestra no presenta más exigencias que las de un análisis convencional de suelos. De todos modos, sería necesario evaluar tiempos más cortos de incubación (por ejemplo 7 días en lugar de 15), así como otros detalles metodológicos (contenido de humedad de la muestra, peso de suelo incubado) con el objetivo de aumentar su valor predictivo y practicidad. Índices de esta naturaleza han sido propuestos en otras partes del mundo (Nueva Zelanda) para basar la recomendación de fertilización de pasturas con S (Ghani, 1994).

3.a.5- VALORACIÓN DE LAS INCUBACIONES EN RELACION A OTRAS VARIABLES DE SUELO

Casi todas las variables de suelo mejoraron su valor predictivo (la excepción fue la relación MO/[arcilla+limo]) cuando se consideró sólo el grupo de ensayos elegido para las incubaciones (excluyendo a Paraná I-1) en lugar de la totalidad de los experimentos de la red (ver Figura 9 y Tabla 14). Los valores de R^2 y la significancia estadística de los respectivos modelos de regresión lineal para este grupo reducido de ensayos se presentan en la Tabla 16. Al igual que en el análisis de toda la red, la ecuación compuesta por las variables MO/arcilla y S-sulfatos (0-60 cm) presentó mejor ajuste que cualquier otro modelo, logrando explicar el 84 % de la respuesta a la fertilización azufrada en Soja.

Comparativamente, S-inc presentó un menor valor predictivo, aún cuando esta variable se integró en un modelo con S-sulfatos (0-60 cm) tratando de reflejar el S potencialmente mineralizable y la disponibilidad inicial del nutriente.

Tabla 16- *Coefficiente de determinación y significancia estadística de modelos de regresión lineal de la respuesta a la fertilización azufrada en Soja, en base a distintas variables de suelo, para 11 sitios de bajo error experimental. Campaña 2000/01.*

Modelo propuesto	Coefficiente de determinación y significancia estadística
Resp=345 – 12 S-inc	R ² =0,56 P=0,0081
Resp=401 – 84 MO	R ² =0,57 P=0,0074
Resp=355 – 3222 MO/limo	R ² =0,75 P=0,0005
Resp=510 – 2720 MO/arcilla	R ² =0,70 P=0,0012
Resp=89 + 317 MO/(limo + arcilla)	R ² =0,04 P=0,5622
Resp=543 – 10 S-inc – 23 S-sulfatos (0-60 cm)	R ² =0,60 P=0,0269
Resp=708 – 67 MO – 35 S-sulfatos (0-60 cm)	R ² =0,67 P=0,0112
Resp=574 – 2765 MO/limo – 24 S-sulfatos (0-60 cm)	R ² =0,80 P=0,0016
Resp=846 – 2317 MO/arcilla - 38 S-sulfatos (0-60 cm)	R ² =0,84 P=0,0006
Resp=756 – 46 MO/(limo + arcilla) + 61 S-sulfatos (0-60 cm)	R ² =0,38 P=0,1459

En la Tabla 17 se describen las correlaciones entre las variables de suelo que mejor anticiparon la respuesta a S.

Tabla 17- *Análisis de multicolinealidad entre diferentes variables de suelo para 11 sitios de bajo error experimental cuyas muestras de suelos fueron incubadas. Campaña 2000/01.*

	Arcilla (%)	MO (%)	Relación MO/limo	Relación MO/Arcilla	S-inc (mg kg⁻¹)	S-sulfatos (0-20 cm) (mg kg⁻¹)	S-sulfatos (0-40 cm) (mg kg⁻¹)
MO (%)	r=0,51 P=0,11						
MO/limo	r=0,12 P=0,73	r=0,06 P=0,87					
MO/arcilla	r=0,15 P=0,66	r=0,75 P=0,008 (***)	r=0,01 P=0,98				
S-inc (mg kg⁻¹)	r=0,48 P=0,14	r=0,84 P=0,001 (***)	r=0,06 P=0,85	r=0,62 P=0,04 (**)			
S-sulfatos (0-20 cm) (mg kg⁻¹)	r=0,50 P=0,12	r=0,41 P=0,21	r=0,40 P=0,22	r=0,10 P=0,78	r=0,64 P=0,03 (**)		
S-sulfatos (0-40 cm) (mg kg⁻¹)	r=0,09 P=0,78	r=0,34 P=0,31	r=0,46 P=0,15	r=0,26 P=0,45	r=0,59 P=0,05 (*)	r=0,82 P=0,002 (***)	
S-sulfatos (0-60 cm) (mg kg⁻¹)	r=0,12 P=0,72	r=0,43 P=0,19	r=0,36 P=0,28	r=0,32 P=0,34	r=0,63 P=0,04 (**)	r=0,78 P=0,005 (***)	r=0,98 P=0,0000 (***)

(*) *Correlación entre variables significativa ($\alpha= 0,1$).*

(**) *Correlación entre variables significativa ($\alpha= 0,05$).*

(***) *Correlación entre variables significativa ($\alpha= 0,01$).*

Como se desprende de la Tabla 17, S-inc está significativamente correlacionado con MO y con MO/arcilla. Estas dos últimas variables son más fáciles y económicas de medir, ya que la determinación de S-inc implica dos análisis químicos y el costo energético necesario para mantener controlada la temperatura durante el período de incubación. S-inc también está correlacionado con la concentración de S-sulfatos, no sólo en el horizonte superficial (0-20 cm) sino también a mayores profundidades (0-40 y 0-60 cm; Tabla 17); por lo tanto, no podrían integrarse en un modelo aditivo ya que estarían explicando similares fuentes de variación. En cambio, MO y MO/arcilla no están correlacionadas con S-Sulfatos cualquiera sea la profundidad considerada, y sería factible integrarlas en un modelo único. Las variables MO/arcilla y S-sulfatos (0-60 cm) no estuvieron así correlacionadas tanto analizando la red entera (21 sitios; ver punto **3.a.3** de este capítulo) como cuando se consideran los 11 sitios en que se evaluó S-inc. Integradas en una misma ecuación mostraron mejor ajuste con la respuesta a S que cualquier otro modelo, y desde el punto de vista operativo ambas variables son sencillas de valorar y a un bajo costo, pudiendo disponerse de los resultados en un período de tiempo muy breve desde la toma de la muestra de suelo. Estos aspectos convierten a este modelo en el más apropiado para anticipar la respuesta a la fertilización azufrada en base a las variables de suelo analizadas durante la campaña 2000/01.

Es necesario destacar que los parámetros de este modelo difieren en buena medida de los del modelo análogo que surge del análisis de los datos de toda la red (Tabla 14). Esta inestabilidad del modelo, si bien no afecta la valoración

realizada sobre la utilidad de las variables que lo integran, impide el establecimiento de umbrales críticos con una precisión razonable. Las causas de la inestabilidad en los parámetros del modelo deben buscarse en el muy limitado número de sitios que presentaron respuesta a S, lo que hace que pocos ensayos con ese comportamiento gobiernen la tendencia del conjunto de los datos. Esta dificultad podría superarse si se dispusiera de un número equilibrado de sitios en las zonas de respuesta y de no respuesta a la fertilización.

3.b- ENSAYOS CAMPAÑA 2001/02

3.b.1- RESULTADOS GENERALES DE LA RED: RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN AZUFRADA EN SOJA DURANTE EL SEGUNDO AÑO DE ENSAYOS

En la Tabla 18 se presentan los rendimientos de los ensayos conducidos durante la campaña 2001/02, así como los análisis estadísticos de estos resultados y las respuestas medias al agregado de S.

Tabla 18- Rendimiento de grano, significancia estadística, coeficiente de variación (C.V.) y respuesta media a la fertilización con S. Ensayos campaña 2001/02. Los rendimientos son promedio de cuatro repeticiones (tres en Río Segundo y Constitución, dos en Junín II-2). Respuesta a S = $[(T2-T0) + (T3-T1)]/2$. Para un mismo sitio, los rendimientos seguidos de diferentes letras difirieron significativamente (LSD, $\alpha=0,10$).

Partido/ Departamento	Rendimiento (kg ha ⁻¹)					Anova P > F	C.V. (%)	Respuesta a S (kg/ha ⁻¹)
	T0	T1	T2	T3	T4			
30. Tercero Arriba	3579	3939	3651	3844	3611	0,2043	6,41	-11
31. Río Segundo	2816	2985	2634	2873	2648	0,1955	6,67	-147
32. San Jerónimo II-1	3843 d	4288 bc	4141 c	4478 ab	4586 a	0,0020	4,78	244
33. Belgrano II-1	4330	4287	4384	4441	4498	0,4374	3,81	104
34. Paraná II-1	3062	3140	2888	2888	2884	0,2468	6,50	-213
35. Uruguay	2661 b	3008 a	2069 c	2463 b	2681 b	0,0008	8,42	-568
36. Marcos Juárez II-1	3669	3901	3587	3730	3688	0,5083	7,42	-127
37. Río Cuarto II-1	2840	2667	2924	2727	3147	0,1303	8,86	72
38. Constitución	4279	4391	4320	4630	4067	0,2084	5,93	140
39. Colón II-1	4479 b	4656 b	4745 b	5199 a	4691 b	0,0084	4,73	404
40. S.A. de Areco II-1	4278	4294	4304	4468	4429	0,7741	5,99	101
41. Junín II-1	3265 c	4154 a	3687 b	4352 a	4284 a	0,0005	7,04	310
42. Junín II-2	3482 a	3502 a	2755 b	3442 a	3486 a	0,0225	4,31	-394
43. 9 de Julio II-1	2746 d	3427 bc	3124 cd	3786 ab	3981 a	0,0117	12,81	369
44. General Pinto	4202	4304	3978	4579	4694	0,1435	9,15	25
45. Tandil II-2	2719	2443	2885	2493	2762	0,9071	28,38	108
46. Capital II-1	2241 b	2484 ab	2170 b	2744 a	2196 b	0,0723	12,29	95

En el segundo año de ensayos fue muy poco frecuente observar respuesta a la fertilización con S, registrándose diferencias significativas ($P < 0,10$) entre los tratamientos T2 y T0 en dos casos, y entre los tratamientos T3 y T1 en una sola oportunidad. Con respecto a la magnitud de las respuestas a S, y considerando los incrementos medios (con y sin P), se determinaron aumentos de rendimiento mayores a 200 kg ha^{-1} en cuatro ensayos, y en tres de ellos la respuesta fue superior a 300 kg ha^{-1} . Dos de los sitios con respuesta significativa se localizaron en el norte de Buenos Aires, y el restante en el centro de Santa Fe. A través de dos años, la región que comprende el centro-sur de Santa Fe y el centro-norte de Buenos Aires, junto a la provincia de La Pampa, fueron las únicas áreas en las que se observaron incrementos significativos de rendimiento, aunque en esta última provincia solamente un ensayo durante el primer año manifestó este comportamiento. Esto indicaría que en amplios sectores de la zona sojera argentina los suelos estarían en condiciones de satisfacer las necesidades de S de un cultivo de Soja de primera, y que el potencial de respuesta en estas áreas es hoy aún limitado. En coincidencia con estos resultados, en la Figura 11, en la cual se grafica la respuesta a S y su desviación estándar para los 17 ensayos de la campaña 2001/02, se observa la falta de una tendencia definida a aumentar los rendimientos con la aplicación de este nutriente.

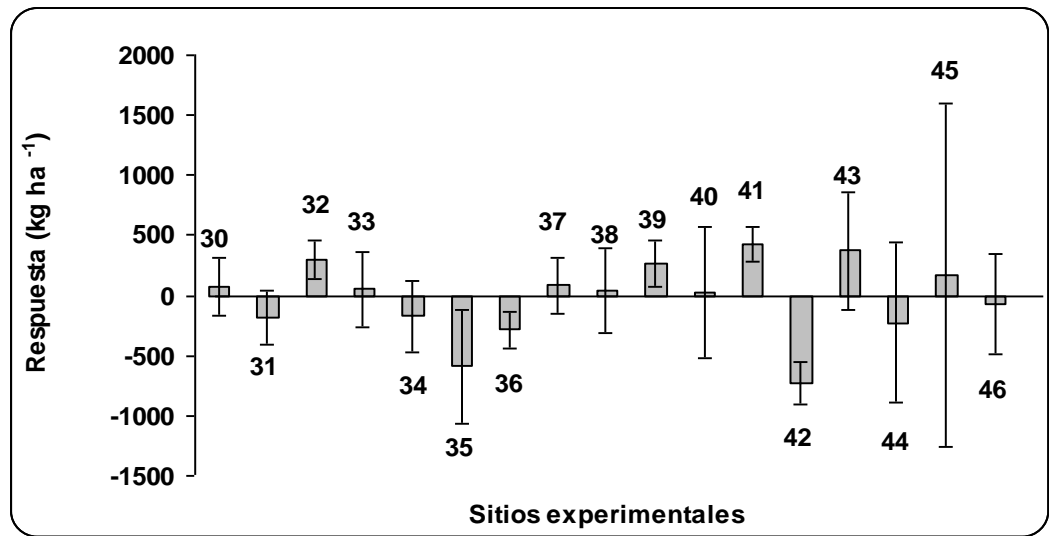


Figura 11.a

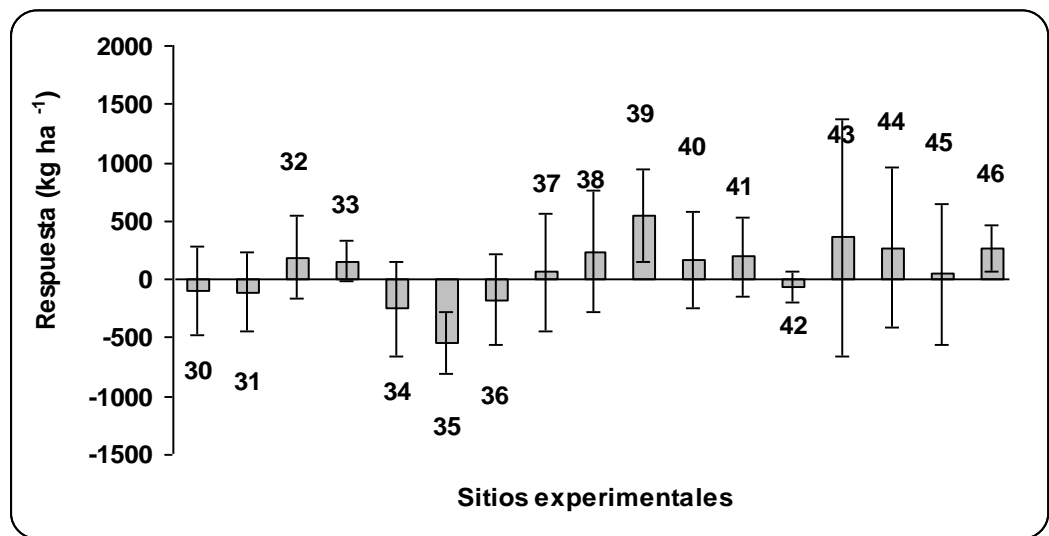


Figura 11.b

Figura 11- Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera sin agregado de P (a) o con agregado de P (b). Ensayos campaña 2001/02. Los números corresponden a los sitios presentados en la Tabla 2. Las barras grafican la respuesta media a S y las líneas verticales representan la desviación estándar respecto de la media.

Considerando los tratamientos sin fertilización fosforada de base (Figura 11.a) sólo los ensayos San Jerónimo II-1, Colón II-1 y Junín II-1 presentaron respuestas a S positivas superiores a la desviación estándar respecto de la media. Esta misma situación se repitió en dos ensayos (Colón II-1 y Capital II-1) al analizar los tratamientos con agregado de P (Figura 11.b).

3.b.2- PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA A S EN BASE A VARIABLES DE MANEJO

Los ensayos Junín II-2 (dos repeticiones perdidas) y Tandil II-1, afectado por un error experimental demasiado elevado en los rendimientos (C.V.=28,4 %; Tabla 18) fueron excluidos del análisis de los resultados. Tampoco fue tenido en cuenta al ensayo Uruguay, cuya importante respuesta negativa ($P < 0,10$) a la fertilización con S no tiene explicación aparente. Como sucediera en el primer año de ensayos, no se determinaron diferencias de respuesta a la fertilización azufrada entre diferentes antecesores ($P=0,21$), sistemas de labranza ($P=0,26$) (Tabla 4) o variedades utilizadas ($P=0,11$) (Tabla 6). Con respecto a las dos últimas variables, la mayoría de los sitios fueron implantados en siembra directa y con el predominio de un cultivar (DM 4800 RR); por lo tanto, no se dispuso de variabilidad suficiente como para estudiar ambas variables con detenimiento. En cambio, se observó un incremento en la respuesta a la fertilización azufrada a medida que aumentaban los años de agricultura continua, siguiendo una función cuadrática (Figura 12). Sin embargo, el ajuste de esta ecuación no es demasiado elevado, y la variable independiente presenta los inconvenientes ya descriptos en el punto **3.a.2** de este capítulo.

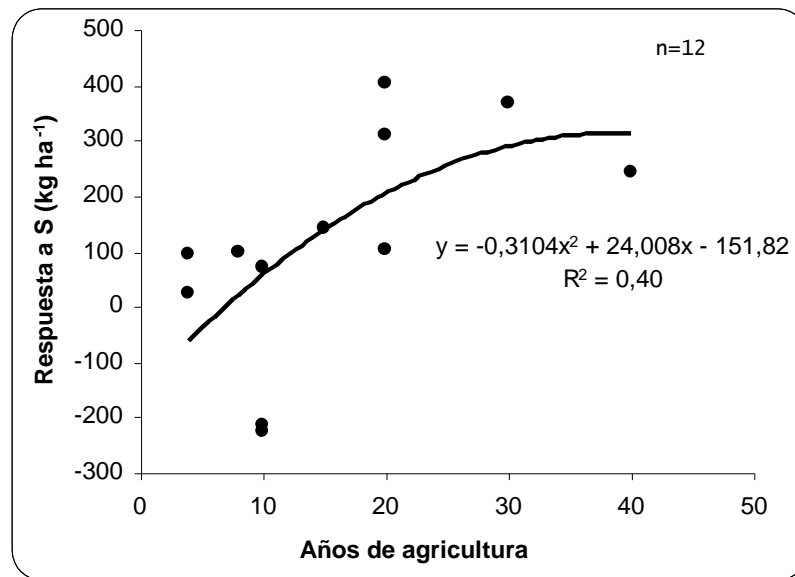


Figura 12- Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera en función de los años de agricultura continua desde la última pradera. Ensayos campaña 2001/02. Los datos de la historia agrícola de los sitios fueron suministrados por los propios productores. Se presenta la información proveniente de 12 sitios: se eliminaron del análisis los ensayos Junín II-2, Tandil II-1 y Uruguay (ver punto 3.b.2), y a estos se le suman los dos sitios sin información de años de agricultura (Tabla 4).

3.b.3- PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA A S EN BASE A PARÁMETROS DE SUELO EVALUADOS A LA SIEMBRA

En la Tabla 19 se presentan los datos de las variables de suelo que fueron evaluadas con objetivo de diagnóstico.

Tabla 19- Variables de suelo evaluadas a la siembra con objetivo de diagnóstico de la fertilidad azufrada en Soja de primera. Ensayos campaña 2001/02. Los valores presentados son promedio de las repeticiones de cada ensayo.

Partido/ Departamento	MO (%)	S-SO ₄ ²⁻ 0-20 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 20-40 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 40-60 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 0-40 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 0-60 cm (mg kg ⁻¹)	Arcilla (%)	Limo (%)	MO/ arcilla	MO/(arcilla + limo)
30. Tercero Arriba	1,69	9,60	8,90	9,20	9,25	9,23	14,10 (**)	34,60 (**)	0,120	0,035
31. Río Segundo	1,03	8,70	10,50	12,60	9,60	10,60	11,60 (**)	19,10 (**)	0,089	0,034
32. San Jerónimo II-1	2,68	9,63	8,13	7,45	8,88	8,40	25,00	72,50	0,107	0,027
33. Belgrano II-1	3,08	8,60	8,00	8,80	8,30	8,47	20,50	70,80	0,150	0,034
34. Paraná II-1	3,56	10,00	9,80	8,75	9,90	9,52	35,63	62,61	0,100	0,036
35. Uruguay (*)	3,36	11,40	12,80	13,70	12,10	12,63	38,74	53,10	0,087	0,037
36. Marcos Juárez II-1	2,61	10,15	8,48	7,75	9,32	8,79	25,70	69,77	0,102	0,027
37. Río Cuarto II-1	2,06	9,03	8,93	8,50	8,98	8,82	13,80 (**)	34,90 (**)	0,149	0,042
38. Constitución	2,75	9,70	8,97	7,80	9,34	8,82	22,74	64,91	0,121	0,031
39. Colón II-1	3,13	10,25	8,75	8,23	9,50	9,08	23,18	48,49	0,135	0,044
40. S.A. de Areco II-1	2,85	10,63	9,93	no evaluado	10,28	no evaluado	26,60	57,46	0,107	0,034
41. Junín II-1	2,74	11,40	11,40	11,58	11,40	11,46	15,42	26,04	0,178	0,066
42. Junín II-2 (*)	2,54	10,35	9,55	10,60	9,95	10,17	15,42	26,04	0,165	0,061
43. 9 de Julio II-1	3,54	8,90	8,80	8,20	8,85	8,63	14,70	29,20	0,241	0,081
44. General Pinto	2,60	7,60	5,80	4,80	6,70	6,07	12,10	19,00	0,215	0,084
45. Tandil II-1 (*)	4,36	9,07	14,87	26,57	11,97	16,84	29,40	41,80	0,148	0,061
46. Capital II-1	1,46	9,78	8,70	8,43	9,24	8,97	8,24 (**)	31,64 (**)	0,177	0,037

(*) Ensayos no considerados en la evaluación de herramientas de diagnóstico. (**) Determinado en laboratorio.

En la Figura 13 se grafica la respuesta a la fertilización azufrada en función de algunas de las variables presentadas en la Tabla 19, o de índices calculados a partir de ellas.

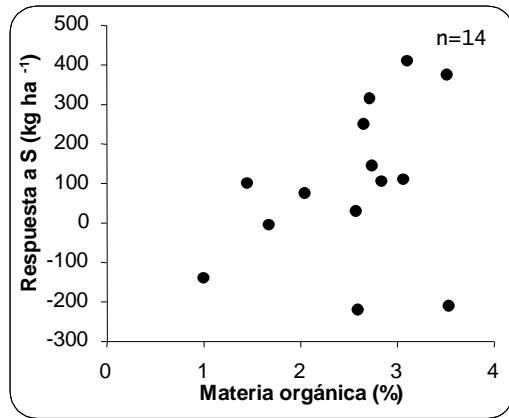


Figura 13.a

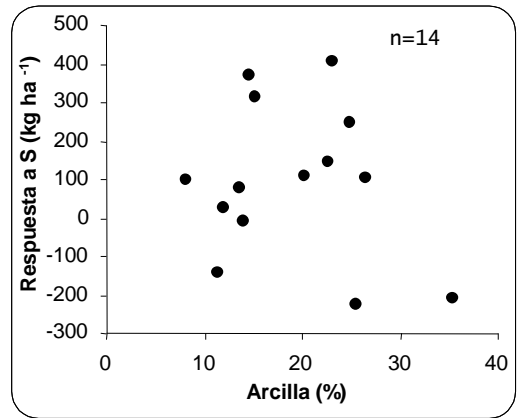


Figura 13.b

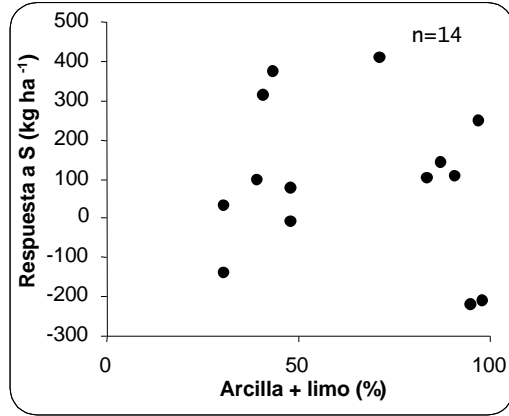


Figura 13.c

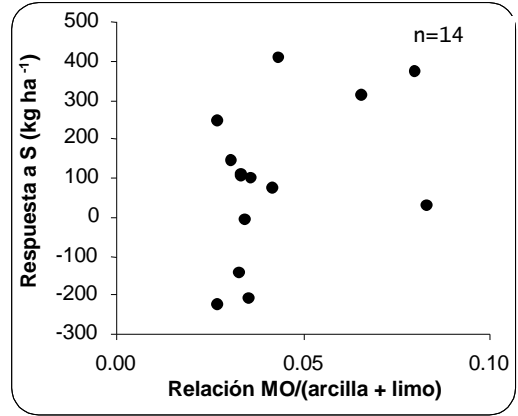


Figura 13.d

(continúa...)

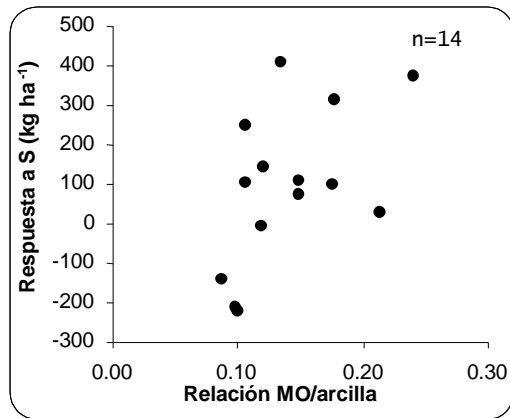
Figura 13- (continuación)

Figura 13.e

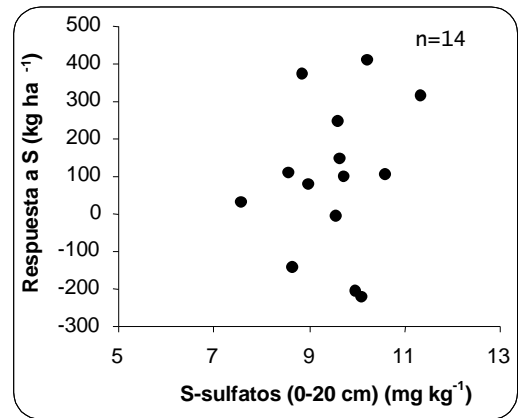


Figura 13.f

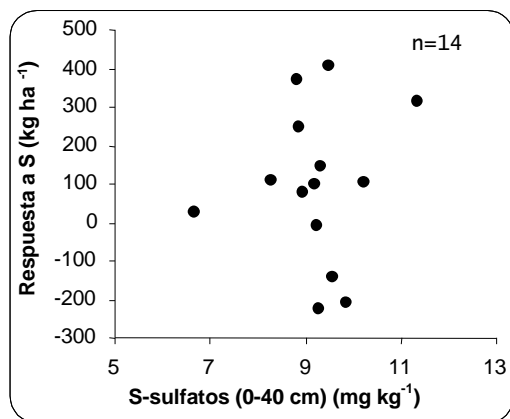


Figura 13.g

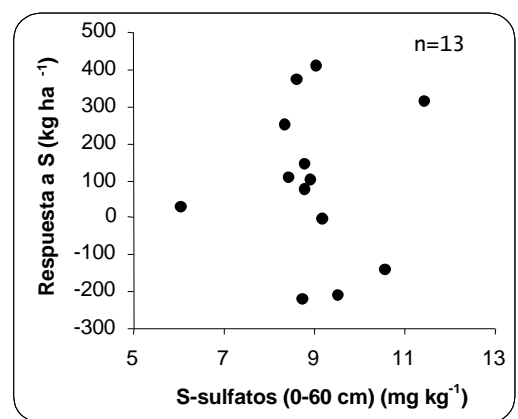


Figura 13.h

Figura 13- Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera en función de parámetros de suelo evaluados a la siembra. Ensayos campaña 2001/02.

Ninguna variable de suelo logró explicar satisfactoriamente la respuesta al agregado de S durante la campaña 2001/02. Más aún, algunas de ellas, como MO, Relación MO/arcilla y Relación MO/(arcilla + limo), parecieron mostrar una relación inversa (la respuesta tendió a aumentar al incrementarse el valor de estas variables), si bien estas asociaciones son débiles y sin ningún sentido biológico.

Del mismo modo, el procedimiento Stepwise ($\alpha=0,10$) seleccionó la variable MO/arcilla, pero con una tendencia positiva (a mayor valor del índice, mayor respuesta) y muy bajo ajuste ($R^2=0,28$).

Al menos en parte, la explicación de estos resultados podría estar asociada a la limitada confiabilidad de los rendimientos determinados en el segundo año de ensayos. En primer lugar, cabe destacar que además de los tres sitios descartados a priori (Junín II-2, Tandil II-1 y Uruguay), varios ensayos presentaron algunas deficiencias metodológicas, tales como inapropiada aleatorización (S. A. de Areco II-1 y 9 de Julio II-1), menor número de repeticiones (Río Segundo y Constitución), o una inferior representatividad de las muestras de suelo (una muestra compuesta en todo el sitio experimental, en lugar de tomar muestras por bloque) (Río Segundo y Belgrano II-1). Como factor adicional, puede agregarse que varios de los ensayos recibieron precipitaciones por encima de las normales, especialmente durante el mes de marzo (Tabla 20), lo que en muchos casos ocasionó el anegamiento de algunas de las parcelas.

Tabla 20- Precipitaciones registradas en los sitios experimentales durante el período siembra-cosecha. Ensayos campaña 2001/02.

Partido/ Departamento	Precipitaciones en el ciclo (mm)	Precipitaciones históricas Nov.-Mar.(mm)	Precipitaciones en Marzo (mm)	Precipitaciones históricas Marzo(mm)
30. Tercero Arriba	(sin información)	580	(sin información)	91
31. Río Segundo	(sin información)	580	(sin información)	91
32. San Jerónimo II-1	626	633	230	143
33. Belgrano II-1	526	564	267	105
34. Paraná II-1	(sin información)	605	134	142
35. Uruguay	1040	588	298	136
36. Marcos Juárez II-1	785	564	183	105
37. Río Cuarto II-1	292	602	40	127
38. Constitución	492	569	230	125
39. Colón II-1	652	540	233	124
40. S.A. de Areco II-1	611	540	186	124
41. Junín II-1	480	572	144	138
42. Junín II-2	622 (*)	572	230 (*)	138
43. 9 de Julio II-1	758	592	565	131
44. General Pinto	(sin información)	(sin información)	(sin información)	(sin información)
45. Tandil II-1	580	479	147	111
46. Capital II-1	455	449	85	92

(*) Precipitaciones hasta el 22 de Marzo, fecha de cosecha del ensayo.

Los valores históricos corresponden a la localidad más próxima al ensayo, o en su defecto a una localidad cercana. Las localidades y el período de referencia son los siguientes: Río Tercero: 1961/1985, Rafaela: 1961/2000, Paraná: 1961/2000, Concepción del Uruguay: 1968/2000, Río Cuarto: 1961/2000, Marcos Juárez: 1968/2000, Wheelwright: 1977/2001, Pergamino: 1910/1999, Junin: 1961/2000, 9 de Julio: 1961/2000, Tandil: 1968/2000, Santa Rosa: 1961/2000. Información suministrada por el Instituto de Clima y Agua (Agrometeorología) CIRN - INTA Castelar, Sección Agrometeorología, EEA-INTA Pergamino; y los propios productores de los establecimientos.

Teniendo en cuenta las dificultades enumeradas, los resultados del segundo año no conforman un juego de datos suficientemente confiable como para poder confirmar la jerarquización de herramientas de diagnóstico propuesta en la primera campaña, ni tampoco brindan elementos suficientes para refutarlas o disminuir su validez. Considerando, además, que durante este segundo año no se logró identificar ninguna variable o modelo que pudiera explicar la respuesta de la Soja a la fertilización azufrada, aquellas identificadas como más promisorias durante el primer año pueden considerarse como la más firme elaboración hacia la definición de un método de diagnóstico con este propósito.

La falta de certidumbre en los rendimientos de la campaña 2001/02 hizo que no se profundizara en la evaluación de otras herramientas de diagnóstico tales como los análisis foliares o las incubaciones de suelo.

4-CONCLUSIONES

- Durante la campaña 2000/01 la respuesta a la fertilización azufrada en Soja tuvo una frecuencia limitada y fue de escasa magnitud. Los sitios con respuesta positiva se concentraron principalmente en el centro-sur de Santa Fe y centro-norte de Buenos Aires.
- Ninguna variable de suelo fue capaz de explicar satisfactoriamente la respuesta a S. Algunos índices que representan la capacidad del suelo para mineralizar sulfatos, como MO, MO/arcilla y S-inc mostraron una leve tendencia, pero sin el grado de ajuste necesario como para basar únicamente en ellos un diagnóstico de fertilización azufrada. Estos tres indicadores están correlacionados entre sí, lo que demuestra que explican procesos o fuentes de variación similares. La variable S-

sulfatos (0-60 cm) mostró un valor predictivo semejante, siendo superior a la valoración de S-sulfatos a menores profundidades.

➤ Una ecuación que integró MO/arcilla y S-sulfatos 0-60 cm fue el modelo seleccionado a través de un proceso de regresión lineal múltiple, explicando con un buen grado de ajuste la respuesta a la fertilización tanto en toda la red ($R^2=0,70$) como en un grupo de ensayos de bajo error experimental ($R^2=0,84$).

Las variables que lo integran no están correlacionadas considerando los datos de toda la red ($r=0,33$; $P=0,14$) o los de los sitios seleccionados para las incubaciones ($r=0,32$; $P=0,34$). En términos agronómicos, estas variables estarían expresando la disponibilidad inicial del nutriente en el perfil (S-sulfatos a 0-60 cm) y una estimación indirecta de la capacidad del suelo para mineralizar S durante el ciclo del cultivo (relación MO/arcilla).

➤ El modelo propuesto tiene como virtudes estar basado en variables simples, fáciles de medir y a un bajo costo, con rápida disponibilidad de los resultados y sin restricciones metodológicas más severas que las de un análisis convencional de suelos.

➤ Las incubaciones de suelo, si bien no presentaron mejor valor predictivo que otros indicadores para explicar procesos similares, arrojaron resultados lo suficientemente promisorios como para justificar que se continúe evaluando su utilidad como herramienta de diagnóstico.

➤ En la campaña 2001/02 solamente tres sitios manifestaron respuesta positiva a la fertilización azufrada. La evaluación de variables de suelo no aportó información de igual grado de confiabilidad a la generada en la campaña

precedente. Una serie de inconvenientes metodológicos en algunos de los ensayos y las características climáticas que afectaron a los cultivos, en buena parte de los casos afectados con lluvias de infrecuente magnitud e intensidad, hacen recomendable no modificar las conclusiones surgidas de la primera campaña, y considerar a los resultados obtenidos en ese primer año de ensayos como la mejor aproximación al objetivo de elaborar un método de diagnóstico de fertilidad azufrada para el cultivo de Soja.

➤ Los resultados presentados en este Capítulo responden a los objetivos planteados de evaluar la potencialidad de respuesta de la Soja a la fertilización azufrada en una amplia región, y permitir jerarquizar indicadores de suelo con fines de diagnóstico. Sin embargo, los coeficientes que acompañan a las variables propuestas (Relación MO/arcilla y S-sulfatos [0-60 cm]) mostraron cierta inestabilidad cuando se comparó la ecuación derivada de toda la red con la resultante del grupo seleccionado de 11 ensayos, lo cual impide definir con certeza umbrales críticos, así como predecir la magnitud de los incrementos de rendimiento a obtener con el cambio en el valor de las variables.

➤ El modelo de dos variables propuesto en este capítulo permite comprobar las hipótesis planteadas en el punto 4 del **Capítulo I** de esta tesis.

CAPITULO V

EVALUACIÓN DE HERRAMIENTAS DE DIAGNÓSTICO: ANÁLISIS FOLIARES

1- INTRODUCCIÓN

El análisis de tejido vegetal es otra herramienta que suele utilizarse para diagnosticar deficiencias de S en los cultivos. Las determinaciones pueden ser absolutas (ej: contenido de S total) o relativas, estableciendo relaciones entre nutrientes o entre formas químicas de S (ej: N/S o sulfatos/S total) (Spencer y Freney, 1980; Nuttall, 1985; Johnson, 1987; Agrawal y Mishra, 1994). Estas últimas podrían proveer una mejor estimación de la capacidad del vegetal para constituir proteínas, siendo menos variables con el órgano muestreado y el momento en el ciclo que la medición absoluta del nutriente (Jones, 1986).

Para los análisis foliares no es conveniente muestrear un órgano en crecimiento, ya que la planta siempre tiende a removilizar nutrientes para atender la demanda de los tejidos meristemáticos (Marschner, 1995). La última hoja expandida es un órgano comúnmente utilizado para mediciones foliares en gramíneas (Sainz Rozas y Echeverría, 1999). Además, debe estandarizarse la edad de la planta, ya que la concentración de S varía con el tiempo debido al proporcionalmente mayor incremento en la biomasa respecto a la absorción de nutrientes, y a la retranslocación de éstos hacia órganos reproductivos (Sunarpi y Anderson, 1997; Ferraris et al., 2000). La determinación puede realizarse en un estado vegetativo temprano, lo cual teniendo en cuenta la dinámica de absorción de S descrita en el **Capítulo III**, permitiría corregir una eventual deficiencia en forma oportuna mediante fertilización. Mediciones foliares en estadíos posteriores (ej: floración), o en los granos o aún en rastrojos de cosecha, tendrían el objetivo de monitorear el estado nutricional del cultivo con vistas a decidir la fertilización

para la siguiente campaña. Prácticas de este tipo han sido propuestas en algunas zonas de EE UU, donde se determina el contenido de nitratos en la base de tallos de Maíz al momento de la cosecha para estimar las necesidades de N del próximo cultivo (Blackmer et al., 1999).

Por medio de estos análisis se asume que la concentración de S en un órgano de la planta representaría la disponibilidad del nutriente en el suelo. El umbral crítico es definido como aquella concentración con la que se alcanza el 90-95 % del rendimiento máximo, obtenido en una parcela o sector del lote sin restricciones nutricionales (Jones, 1986). La utilización de esta metodología requiere que se estandarice el órgano de la planta a muestrear y el estado fenológico del cultivo. Por otro lado, no deben existir otros factores que estén alterando la concentración de nutrientes o condicionando la respuesta al agregado de S. Por esta razón, no es un método apropiado para gramíneas, dado que en ellas el N es frecuentemente el nutriente que a nivel de campo está limitando el rendimiento. Como técnica para determinar el contenido de S total, se ha generalizado la descrita por San Martín et al. (1988), la cual con igual precisión a las propuestas por Blanchar et al. (1965) y Lachica Garrido (1964), permite quintuplicar el número de determinaciones realizadas por día.

La relación (N/S)_{total} es especialmente apropiada cuando la nutrición nitrogenada es equilibrada. Esto ocurre en leguminosas bien noduladas, en las cuales el suministro de N sigue el ritmo de la fijación biológica, y el índice se vuelve sensible a la provisión de S (Jones, 1986). Ante deficiencias en el contenido de este último nutriente, aumenta el nivel de N no proteico, elevando el

índice su valor y reflejando así las limitaciones de S en las plantas para mantener una normal síntesis proteica. Este índice no es apropiado para gramíneas, en las cuales la alta demanda de N hace que la concentración de este elemento sea el factor condicionante del metabolismo (Jones, 1986). En el centro-sur de Santa Fe se han registrado relaciones de 17/1 para Soja fertilizada, mientras que para esos mismos cultivos no fertilizados el valor del índice fue de 20/1 (Martínez y Cordone, 1998). Otros trabajos citan relaciones óptimas para Soja de 11/1 (Agrawal y Mishra, 1994), y deficiencias de S con valores de 16/1 o mayores (Gutiérrez Boem y Scheiner, 1999).

Las evaluaciones foliares pueden realizarse también por medio de un procedimiento no analítico, como el que permite la utilización del medidor de clorofila Minolta "SPAD 502". A través de una rápida lectura "in situ", el medidor de clorofila permite evaluar la intensidad de verdor en la hoja, y con ello indirectamente y en forma no destructiva el estado nutricional del cultivo (Echeverría, 2000). El S en cantidades insuficientes provoca amarillamiento de tejidos. Sobre la base de este síntoma, se utiliza dicho medidor que valora la intensidad de coloración de los tejidos. El valor adimensional obtenido puede relacionarse a un tratamiento o sector del lote sin limitaciones de S, que ha sido fertilizado con ese propósito. La preparación de este tratamiento de referencia es recomendable, debido a que la variedad y las condiciones climáticas afectan particularmente el valor de las lecturas del clorofilómetro, no permitiendo así el establecimiento de umbrales críticos absolutos en forma confiable (Ferrari et al., 1999 b, 2000). El medidor de clorofila ha sido utilizado para evaluar deficiencias

de N en Maíz (Sainz Rozas y Echeverría, 1999; Ferrari et al., 1999 *b*). Sin embargo, el método comenzaría a ser sensible en estados de desarrollo avanzados de este cultivo (Sainz Rozas y Echeverría, 1999; Ferrari et al., 1999 *b*), cuando ya es tarde para efectuar correcciones con impacto en los rendimientos bajo condiciones de secano. Mejores resultados se han encontrado en mediciones tardías (en hoja prebandera y bandera) en el cultivo de Trigo cuando el medidor de clorofila se utilizó con el objetivo de estimar parámetros de calidad de grano (Bergh et al., 1999). Fontanive et al. (1996), trabajando con Soja, encontraron buenas correlaciones entre el estado nutricional del cultivo en R2 (plena floración; Fehr y Caviness, 1977) y diferentes componentes del rendimiento, lo cual permite suponer que se podría diferir la evaluación del estado nutricional en esta especie a momentos en los que ya expresa diferencias en el mencionado índice de verdor. Las ventajas del método se basan en su practicidad, bajo costo y rápida obtención de los resultados (Ferrari et al., 1999 *b*). El medidor de clorofila puede utilizarse para evaluar deficiencias en la nutrición azufrada solo si se asume que el cultivo no presenta deficiencias de N. Si no se cumpliera con este requisito, no sería posible distinguir si la lectura del SPAD está indicando una deficiencia de S, N o de ambos nutrientes a la vez, dado que la planta expresa similar sintomatología cuando alguno de ellos no se encuentra en cantidades suficientes (Marschner, 1995; Tisdalle et al., 1993). Sin embargo, en esta red se procedió a la inoculación de la semilla en doble dosis en todos los ensayos, cuidando estrictamente la conservación del inoculante y la distribución uniforme del mismo sobre las semillas, con lo cual se suministró una abundante carga bacteriana que asegurara

la nodulación. A esto se sumó el agregado de Co y Mo, nutrientes esenciales para la fijación biológica de N, lo cual hace presumir que este proceso debió desarrollarse en forma exitosa, y que este nutriente habría estado en una disponibilidad suficiente para el cultivo. Por lo tanto, es posible atribuir las diferencias que se presentaron en el índice de verdor a variaciones en el estado de nutrición azufrada entre tratamientos fertilizados y testigos.

El objetivo del capítulo fue evaluar la asociación existente entre diferentes variables de cultivo (tanto análisis químicos como metodologías no destructivas) y la respuesta de la Soja a la fertilización azufrada.

2- MATERIALES Y MÉTODOS

2.a- CARACTERIZACIÓN DE LAS DETERMINACIONES REALIZADAS

Las mediciones se centraron en los análisis químicos de nutrientes en tejido foliar y en el uso del medidor de clorofila en el estado vegetativo (entre V4 y V6) y reproductivo (entre R2 y R3). En el primero de dichos estados la evaluación se realizó con fines de diagnóstico, ya que en caso de detectarse una deficiencia aún se estaría a tiempo de corregirla mediante fertilización. Esto se debe a la relativamente pequeña absorción de S que el cultivo de Soja registra hasta ese momento (ver **Capítulo III**), y a que la escasa altura de las plantas permite transitar el lote con maquinarias sin dañarlas. Si bien el análisis foliar en un estado reproductivo temprano podría también atender parcialmente a este propósito, el objetivo principal del monitoreo del estado nutricional del cultivo en este estadio avanzado es el de orientar prácticas de fertilización futuras. Aún cuando el S acumulado en floración alcanza recién a alrededor de un tercio del

total (Figuras 3 y 4; **Capítulo III**), lo cual todavía permitiría corregir una eventual deficiencia, el tamaño de las plantas de Soja en ese estado hace que el tránsito por el lote implique un daño significativo al cultivo, especialmente si se ha sembrado en hileras estrechas (35 a 52 cm), por lo que la fertilización no sería entonces una práctica recomendable.

2.b- METODOLOGÍA DE MUESTREO

Los análisis químicos foliares fueron realizados en muestras tomadas en 13 y 11 sitios en los estadíos V4-V6 y R2-R3, respectivamente, de la red de ensayos conducida en la campaña 2000/01. Los criterios para la selección de los ensayos a analizar fueron el bajo coeficiente de variación del experimento, la diversidad geográfica de los sitios, la inclusión de situaciones de respuesta y de no respuesta al agregado de S, y la disponibilidad de la muestra foliar, ya que no en todos los casos se contaba con la misma. En cambio, no se realizaron análisis químicos foliares sobre muestras de los ensayos de la campaña 2001/02, dada la menor confiabilidad de los rendimientos de grano determinados en este segundo año de experimentación, la que ya fuera comentada en el **Capítulo IV** (ver punto **3.b.3**). Dentro de la campaña 2000/01, la diferencia en el número de sitios incluidos en el estudio entre los estadíos V4-V6 y R2-R3 estuvo dada porque las muestras correspondientes al estado vegetativo de los ensayos Tandil I-1 y Tandil I-2 no estaban disponibles al momento de efectuarse los análisis.

En ambos estadíos fenológicos se tomaron 30 muestras de la lámina del folíolo central de la última hoja expandida (V4-V6), o de los tres folíolos de la

última hoja expandida (R2-R3), en este último caso incluyendo sus peciólulos. Las muestras fueron secadas en estufa de circulación forzada a 60 °C y molidas en un molino tipo Willey (< 1mm), y se determinó sobre ellas Ntotal (Kjeldahl, 1883) y Stotal [digestión con ácido nítrico y ácido perclórico, determinación por turbidimetría, (Lisle et al, 1994)], calculándose también con estos datos la relación (N/S)total. La determinación se llevó a cabo sobre muestras provenientes de los tratamientos T0, T1, T2 y T3, que son los de interés para el diagnóstico de S. De cada ensayo seleccionado se analizó una muestra compuesta con material proveniente, en partes iguales, de las cuatro repeticiones de cada tratamiento.

Las lecturas de clorofila se tomaron mediante el uso del medidor Minolta SPAD 502 en 11 ensayos ubicados en el norte de la provincia de Bs As (área de influencia de la EEA-INTA Pergamino) durante la campaña 2000/01. Las evaluaciones de clorofila se efectuaron también durante la campaña 2001/02, debido a que fueron realizadas antes de conocer los datos de rendimiento, sobre 5 ensayos de la misma región. En todos los casos se tomaron 15 lecturas por parcela en los tratamientos T0, T1, T2 y T3 en cada uno de los bloques del ensayo. El medidor se posicionó eligiendo láminas completamente sanas, del folíolo central de la última hoja completamente expandida, sobre plantas representativas de la parcela. El clorofilómetro se posicionó a 1 cm del borde de la lámina, en hojas de color verde homogéneo. Las lecturas se efectuaron en los estadíos (V4-V5) y R2, a excepción de los ensayos S. A. de Areco I-1 y I-2 (Campaña 2000/01) y 9 de Julio II-1 (Campaña 2001/02) donde por dificultades climáticas que impidieron el

acceso a los lotes sólo se realizaron las mediciones correspondientes al estado reproductivo (R2).

2.c- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS Y CÁLCULO DE LA RESPUESTA A S

Las concentraciones foliares de N y S para cada sitio y momento de muestreo no fueron analizadas estadísticamente por disponerse de una única muestra por tratamiento, integrada por submuestras provenientes de los cuatro bloques. En cambio, al disponerse de repeticiones, los valores absolutos de las lecturas de clorofila pudieron ser comparados a través del análisis de la varianza.

Sobre la base de los análisis químicos, se evaluaron las siguientes variables como potenciales herramientas de diagnóstico para decidir la fertilización azufrada en Soja:

Concentración de S T0

Concentración de S T1

IS%S (Índice porcentual de suficiencia basado en la concentración foliar de S) **sin P** = Concentración de S en T0 / Concentración de S en T2

IS%S con P = Concentración de S en T1 / Concentración de S en T3

Relación (N/S) total T0 = Concentración de N en T0 / Concentración de S en T0

Relación (N/S) total T1 = Concentración de N en T1 / Concentración de S en T1

Como ya fuera mencionado, los resultados absolutos de las lecturas de clorofila están influenciados por la variedad y el ambiente en que se desarrolla el cultivo, por lo que los mismos también se expresaron en forma relativa a través de índices de suficiencia de S (ISS) calculados de la siguiente manera:

$$\text{ISS sin P} = \text{Lectura media T0} / \text{Lectura media T2}$$

$$\text{ISS con P} = \text{Lectura media T1} / \text{Lectura media T3}$$

Se evaluó la asociación entre estas variables y la respuesta media a S, la cual fue calculada de la siguiente forma:

$$\text{Respuesta a S sin P} = \text{Rendimiento T2} - \text{Rendimiento T0}$$

$$\text{Respuesta a S con P} = \text{Rendimiento T3} - \text{Rendimiento T1}$$

De este modo, cada uno de los sitios experimentales aportó una doble información al análisis, según se consideren los tratamientos con o sin fertilización fosforada de base. De esta manera, se pretendió estudiar si el agregado de P podía producir una modificación de la concentración de S en los tejidos foliares de la planta o en los índices de cultivo evaluados. Las relaciones entre las variables foliares y la respuesta a S se estudiaron mediante análisis de regresión y, cuando no se logró ajustar una función por este procedimiento, se intentó una separación de dos poblaciones (ensayos con y sin respuesta a S) por medio de una adaptación del método de los cuadrantes de Cate y Nelson (Cate y Nelson, 1965).

3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN**3.a- Análisis químicos foliares**

Los resultados de los análisis químicos realizados sobre las muestras foliares pertenecientes a los ensayos del ciclo 2000/01 se detallan en las Tablas 21 y 22, para los estadios fenológicos (V4-V6) y (R2-R3), respectivamente.

Tabla 21- *Concentración foliar de N, S, contenido de S en T0 con relación al tratamiento T2 (IS%S sin P), contenido de S en T1 con relación a T3 (IS%S con P) y relación (N/S) total calculada sobre muestras de la lámina del folíolo central de la última hoja expandida. La respuesta a S se calculó como: Respuesta a S sin agregado de P (Resp sin P)=Rendimiento T2 - RendimientoT0; Respuesta a S con agregado de P (Resp con P)= Rendimiento T3 – Rendimiento T1. Muestras tomadas en estado vegetativo (V4-V6) en 13 ensayos de la campaña 2000/01. Las muestras de cada tratamiento fueron compuestas por submuestras provenientes de las 4 repeticiones (30 láminas por repetición).*

(Partido/ Departamento)	Tratamiento	Estadío de muestreo	N (%)	S (%)	IS%S sin P	IS%S con P	Relación (N/S) total	Respuesta sin P (kg ha ⁻¹)	Respuesta con P (kg ha ⁻¹)
3. Belgrano I-1	T0	V6	5,054	0,374	0,99		13,51	442	
	T1	V6	5,236	0,381		0,90	13,74		186
	T2	V6	5,166	0,376					
	T3	V6	5,348	0,423					
10. Caseros	T0	V4	5,334	0,385	0,90		13,86	35	
	T1	V4	5,348	0,430		1,15	12,44		141
	T2	V4	5,460	0,430					
	T3	V4	5,460	0,373					

(continúa...)

Tabla 21- (continuación)

(Partido/ Departamento)	Tratamiento	Estadío de muestreo	N (%)	S (%)	IS%S sin P	IS%S con P	Relación (N/S) total	Respuesta sin P (kg ha ⁻¹)	Respuesta con P (kg ha ⁻¹)
11. General López	T0	V5	5,222	0,389	0,73		13,42	84	
	T1	V5	5,586	0,402		0,88	13,90		88
	T2	V5	5,418	0,530					
	T3	V5	5,768	0,458					
12. Colón I-1	T0	V4	5,180	0,390	0,93		13,27	214	
	T1	V4	4,956	0,430		0,98	11,53		-18
	T2	V4	5,152	0,421					
	T3	V4	5,152	0,439					
14. Pergamino I-2	T0	V4	4,858	0,416	1,07		11,68	-186	
	T1	V4	5,012	0,388		0,92	12,92		46
	T2	V4	5,166	0,390					
	T3	V4	5,012	0,421					
16. S. A. de Areco I-2	T0	V4	4,886	0,404	0,87		12,09	42	
	T1	V4	5,348	0,432		1,04	12,38		558
	T2	V4	4,802	0,465					

	T3	V4	4,914	0,416					
--	----	----	-------	-------	--	--	--	--	--

(continúa...)

Tabla 21- (continuación)

(Partido/ Departamento)	Tratamiento	Estadío de muestreo	N (%)	S (%)	IS%S sin P	IS%S con P	Relación (N/S) total	Respuesta sin P (kg ha ⁻¹)	Respuesta con P (kg ha ⁻¹)
17. Rojas	T0	V4	4,816	0,400	0,97		12,05	29	
	T1	V4	5,138	0,409		0,95	12,57		63
	T2	V4	4,928	0,411					
	T3	V4	4,858	0,430					
18. Junín I-1	T0	V6	4,396	0,393	0,98		11,20	165	
	T1	V6	4,368	0,401		0,93	10,89		182
	T2	V6	4,732	0,402					
	T3	V6	4,998	0,430					
19. Junín I-2	T0	V6	4,718	0,324	0,94		14,58	172	
	T1	V6	4,956	0,338		0,91	14,68		-185
	T2	V6	4,634	0,342					
	T3	V6	4,718	0,373					
20. 9 de Julio I-1	T0	V4	4,816	0,383	0,89		12,59	398	
	T1	V4	5,054	0,387		0,94	13,05		-353
	T2	V4	5,292	0,430					

	T3	V4	5,040	0,411					
--	----	----	-------	-------	--	--	--	--	--

(continúa...)

Tabla 21- (continuación)

(Partido/ Departamento)	Tratamiento	Estadío de muestreo	N (%)	S (%)	IS%S sin P	IS%S con P	Relación (N/S) total	Respuesta sin P (kg ha ⁻¹)	Respuesta con P (kg ha ⁻¹)
21. 9 de Julio I-2	T0	V4	4,690	0,413	0,97		11,35	-320	
	T1	V4	5,404	0,394		0,87	13,70		68
	T2	V4	5,768	0,425					
	T3	V4	5,460	0,456					
22. Tandil I-1	T0	V4	5,040	0,392	1,13		12,86	-121	
	T1	V4	5,026	0,373		0,99	13,47		-147
	T2	V4	4,928	0,347					
	T3	V4	4,970	0,375					
23. Tandil I-2	T0	V4	5,278	0,375	0,82		14,06	-252	
	T1	V4	5,418	0,411		0,96	13,19		46
	T2	V4	5,614	0,456					
	T3	V4	5,460	0,428					

Tabla 22- Concentración foliar de N, S, contenido de S en T0 con relación al tratamiento T2 (IS%S sin P), contenido de S en T1 con relación a T3 (IS%S con P) y relación (N/S) total calculada sobre muestras de los tres folíolos de la última hoja expandida. Muestras tomadas en estado reproductivo (R2-R3) en 11 ensayos de la campaña 2000/01. Las muestras de cada tratamiento fueron compuestas por submuestras provenientes de las 4 repeticiones (30 láminas por repetición). Los valores de Respuesta a S correspondientes a cada experimento son presentados en la Tabla 21.

(Partido/ Departamento)	Tratamiento	Estadío de muestreo	N %	S %	IS%S sin P	IS%S con P	Relación (N/S) total
3. Belgrano I-1	T0	R2	5,474	0,335	0,95		16,34
	T1	R2	5,530	0,318		0,83	17,39
	T2	R2	5,838	0,351			
	T3	R2	6,006	0,381			
10. Caseros	T0	R3	4,872	0,354	0,87		13,76
	T1	R3	5,390	0,385		0,94	14,00
	T2	R3	5,334	0,406			
	T3	R3	5,250	0,411			

11. General López	T0	R2	5,796	0,458	1,08		12,66
	T1	R2	5,880	0,386		1,00	15,23
	T2	R2	5,740	0,423			
	T3	R2	5,838	0,386			16,34

(continúa...)

Tabla 22- (continuación)

(Partido/ Departamento)	Tratamiento	Estadío de muestreo	N %	S %	IS%S sin P	IS%S con P	Relación (N/S) total
12. Colón I-1	T0	R2	6,034	0,467	0,99		12,92
	T1	R2	6,286	0,453		0,93	13,88
	T2	R2	6,090	0,474			
	T3	R2	6,384	0,486			
14. Pergamino I-2	T0	R2	4,914	0,411	1,08		11,96
	T1	R2	5,152	0,404		1,02	12,75
	T2	R2	4,634	0,379			
	T3	R2	5,096	0,397			
16. S. A. de Areco I-2	T0	R2	5,124	0,504	0,94		10,17
	T1	R2	5,250	0,502		0,97	10,46
	T2	R2	5,278	0,539			
	T3	R2	5,278	0,520			
17. Rojas	T0	R2	5,348	0,446	1,10		11,99
	T1	R2	5,460	0,453		0,96	12,05

	T2	R2	5,544	0,404			
	T3	R2	5,642	0,474			

(continúa...)

Tabla 22- (continuación)

(Partido/ Departamento)	Tratamiento	Estadío de muestreo	N %	S %	IS%S sin P	IS%S con P	Relación (N/S) total
18. Junín I-1	T0	R2	5,544	0,462	0,84		12,00
	T1	R2	5,404	0,462		0,93	11,70
	T2	R2	5,642	0,553			
	T3	R2	5,852	0,495			
19. Junín I-2	T0	R2	5,796	0,390	0,98		14,86
	T1	R2	5,488	0,399		0,84	13,75
	T2	R2	5,054	0,397			
	T3	R2	5,544	0,477			
20. 9 de Julio I-1	T0	R2	5,306	0,396	0,92		13,40
	T1	R2	5,474	0,435		0,95	12,58
	T2	R2	5,362	0,430			
	T3	R2	5,544	0,456			
21.	T0	R2	5,432	0,446	1,03		12,18

9 de Julio I-2	T1	R2	5,348	0,449		1,04	11,91
	T2	R2	5,152	0,432			
	T3	R2	5,404	0,430			

En la bibliografía se encuentran muy pocos valores de determinaciones foliares de S en Soja realizadas en estados vegetativos tan tempranos como V4. Ferraris et al. (2001 *a*) reportaron para tratamientos fertilizados concentraciones foliares de entre 0,13-0,15 % de S total, sensiblemente inferiores a las aquí presentadas. Por otra parte, en el **Capítulo III** de esta tesis se pueden observar contenidos, con una amplia variación interanual, que oscilan entre 0,20 y 1,65 % para tratamientos fertilizados con S, si bien en un estado fenológico ligeramente más temprano (V3) y con muestras de hoja completa, incluyendo pecíolos. En cambio, la concentración foliar de N determinada por Ferraris et al. (2001 *a*) fue similar a la registrada en estos ensayos. La gran variabilidad informada respecto de los contenidos foliares de S puede atribuirse a las dificultades para estabilizar el S suspendido luego de la extracción (San Martín et al., 1988), y a la limitada precisión de las determinaciones turbidimétricas utilizadas para su cuantificación sobre el extracto. Como factor adicional, puede mencionarse la posibilidad de que exista consumo de lujo en cultivos muy bien abastecidos.

La mayor parte de los análisis foliares de S mencionados en la literatura corresponden al momento de la floración, típicamente a los estadios R1 o R2. La bibliografía internacional menciona valores de suficiencia de 0,24 % (Flannery, 1989), 0,25 % (Martins, citado por Yamada, 1999), o rangos de suficiencia de 0,21 a 0,40 % de S (Sfredo et al., 1986). En Marcos Juárez, se han observado concentraciones de 0,15 a 0,18 % de S en parcelas fertilizadas con este nutriente (Galarza et al., 2000). En los experimentos detallados en el **Capítulo III** se registraron concentraciones en hojas completas de 0,19 a 0,69 % de S. Como

puede observarse, también en este estado el rango de valores de concentración foliar de S reportados es amplio.

La respuesta al agregado de S en función de la concentración foliar del nutriente en la última hoja expandida y del IS%S para un estado vegetativo temprano (V4-V6) se presenta en la Figura 14.

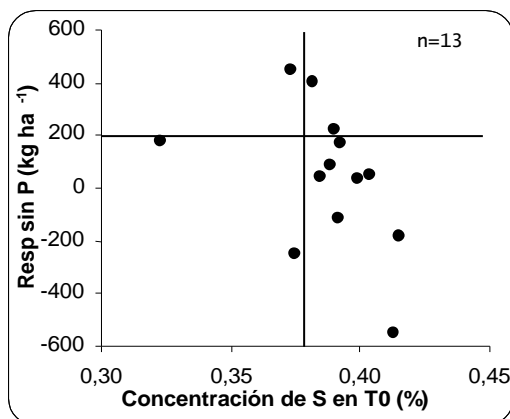


Figura 14.a

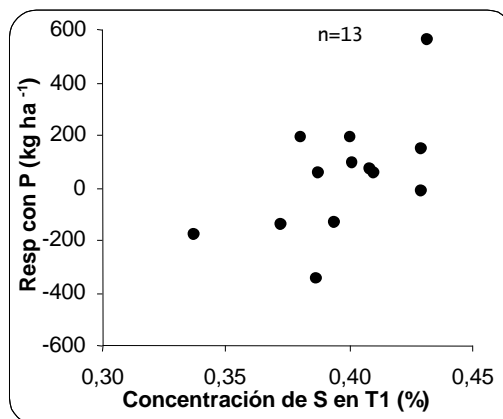


Figura 14.b

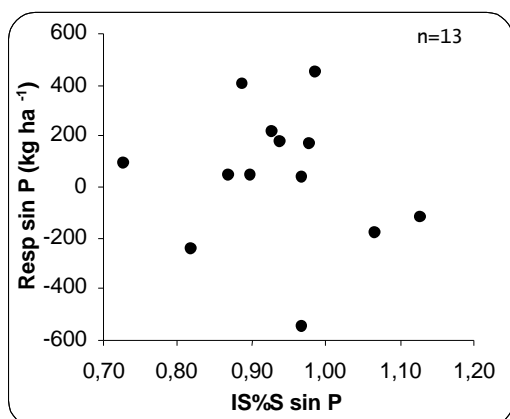


Figura 14.c

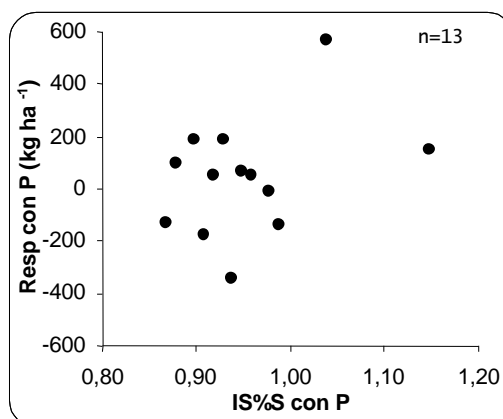


Figura 14.d

Figura 14- Asociación entre la respuesta al agregado de S y la concentración foliar de S en T0 (a), la concentración foliar de S en T1 (b), el IS%S sin agregado de P (c), y el IS%S con agregado de P (d). Muestras de la lámina del folíolo central de la última hoja expandida en un estado vegetativo temprano (V4-V6).

IS%S: Índice de suficiencia basado en las concentraciones foliares de S.

No se logró ajustar una función que relacionara la respuesta a la fertilización con las variables presentadas en la Figura 14. Sin embargo, analizando los datos mediante el método de los cuadrantes, el contenido de S en el

tratamiento T0 (Figura 14.a) permitió anticipar adecuadamente la respuesta en 9 de los 13 sitios analizados. Esta separación fue alcanzada definiendo un umbral de 0,38 % de S, y considerando como ensayos con respuesta positiva a aquellos que tuvieron incrementos de por lo menos 200 kg ha⁻¹ por el agregado de S, aún cuando se observa un marcado desbalance entre cuadrantes provocado principalmente por el gran número de sitios sin respuesta a la fertilización azufrada. En uno de los tres ensayos con respuesta positiva, esta fue anticipada correctamente por el mencionado umbral. No se pudo establecer una asociación similar cuando se consideró la concentración de S en los tratamientos T1, con agregado de P de base (Figura 14.b). La expresión de las concentraciones foliares en forma relativa, a través del IS%S, no permitió mejorar la precisión de la estimación (Figuras 14.c y 14.d). Cabe destacar que los IS%S fueron altos en general, superando aún en los ensayos con respuesta positiva el valor de 0,90, lo que haría que estos índices sean poco sensibles aún cuando demostrasen una buena asociación con la respuesta a la fertilización azufrada.

Idénticas relaciones entre respuesta y concentraciones foliares absolutas y relativas de S se presentan para inicios del período reproductivo en la Figura 15.

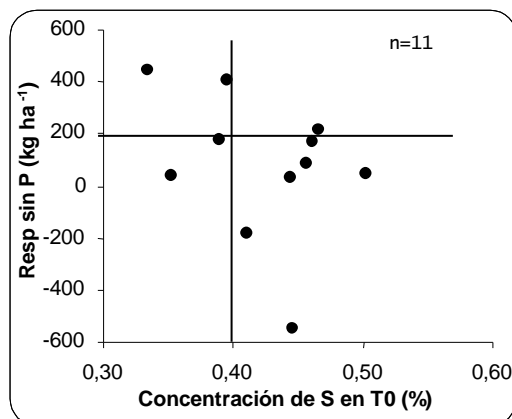


Figura 15.a

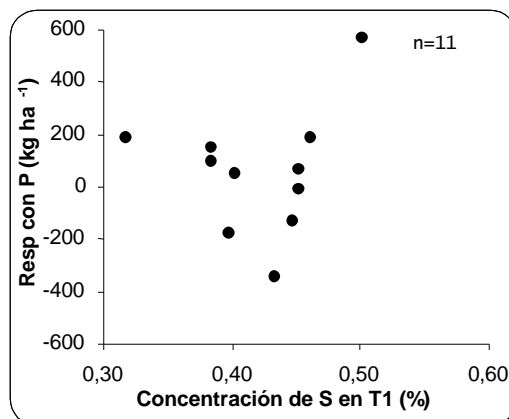


Figura 15.b

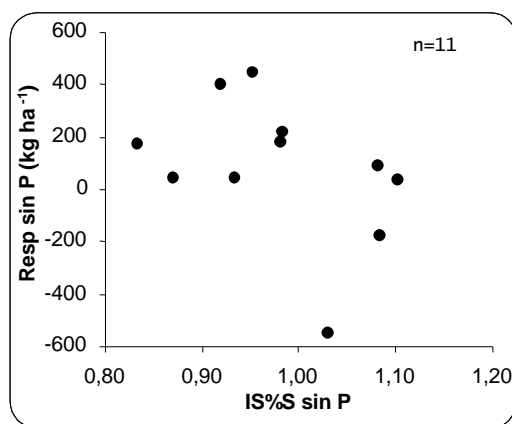


Figura 15.c

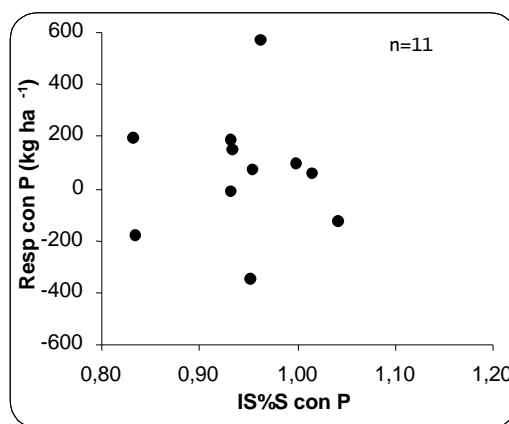


Figura 15.d

Figura 15- Asociación entre la respuesta al agregado de S y la concentración foliar de S en T0 (a), la concentración foliar de S en T1 (b), el IS%S sin agregado de P (c), y el IS%S con agregado de P (d). Muestras de los tres folíolos de la última hoja expandida en un estado reproductivo temprano (R2-R3).

IS%S: Índice de suficiencia basado en las concentraciones foliares de S.

Como se desprende de la Figura 15, el análisis de regresión no permitió establecer una asociación entre las variables foliares evaluadas en alrededor de R2 y la respuesta en rendimiento a la fertilización con S. En forma similar a lo encontrado para el estadio (V4-V6), a través de un análisis de cuadrantes la

concentración de S en la última hoja expandida del tratamiento T0 permitió predecir el comportamiento a la fertilización en la mayor parte de los sitios (8 de los 11 casos evaluados se ubicaron en el cuadrante correcto; Figura 15.a). De igual manera, en dos de los tres sitios con respuesta positiva ($> 200 \text{ kg ha}^{-1}$) al S, ésta pudo ser anticipada correctamente. El umbral crítico establecido es de 0,40, valor que se encuentra en concordancia con lo mencionado por Sfredo et al. (1986). Sin embargo, y tal como sucediera en el estadio (V4-V6), no se pudo establecer una relación similar cuando se analizó la concentración foliar de S en T1 (Figura 15.b). El menor valor predictivo que mostraron los análisis realizados en T1 se debería a la muy baja frecuencia de respuesta al S (un sólo sitio) de los tratamientos que recibieron fertilización fosforada de base o a una modificación en las concentraciones de S generada por el agregado de otro nutriente. Para evaluar esta última hipótesis se realizó un análisis de correlación entre la concentración de S en tejidos de los tratamientos T0 y T1. Tanto en el período vegetativo ($r=0,58$; $P=0,0373$) como en el reproductivo ($r=0,84$; $P=0,0011$), la concentración de S en T0 y T1 estuvieron significativamente correlacionadas, lo que demuestra que son parte de una misma población de datos, y que el agregado de P no produjo cambios en la concentración foliar de S. En este estadio fenológico, la expresión de las concentraciones de S en forma relativa tampoco permitió una buena predicción de la respuesta a la fertilización (Figura 15.c y d).

En la Figura 16 se presenta la relación entre las concentraciones foliares de S en V4 y R2 para los tratamientos que no fueron fertilizados con S.

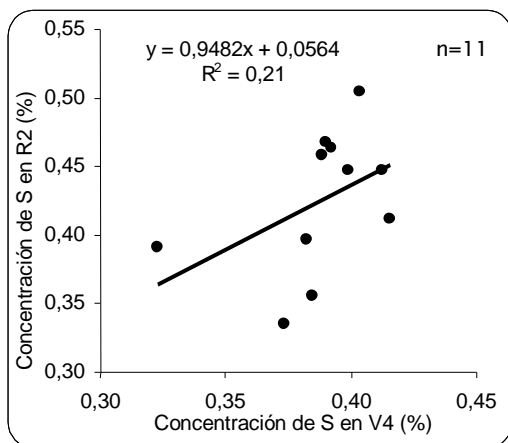


Figura 16.a

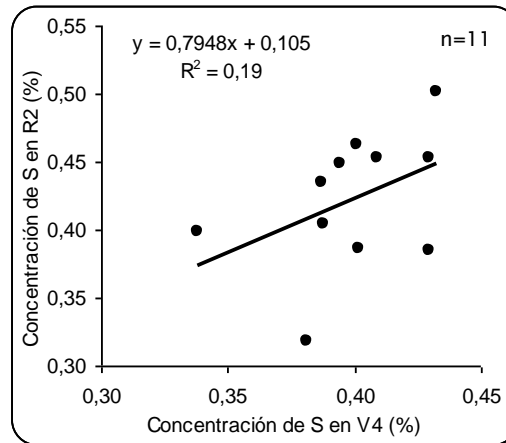


Figura 16.b

Figura 16- Relación entre las concentraciones foliares de S en V4 y R2 para los tratamientos T0 (a) y T1 (b).

No hubo una asociación clara entre las concentraciones foliares de S en V4 y R2, y los ajustes determinados fueron bajos tanto para T0 ($R^2=0,21$) como para T1 ($R^2=0,19$). Esta dispersión podría explicarse por las aún escasas cantidades de materia seca y S acumuladas en ambos estadíos, lo que haría que pequeños cambios en la tasa de crecimiento o absorción de S modifiquen en forma relativamente importante la concentración de este nutriente. Como factor adicional, puede mencionarse que los órganos analizados no fueron exactamente los mismos, ya que mientras en el estadío (V4-V6) la determinación se realizó sobre la lámina central de la última hoja expandida, en (R2-R3) se analizaron las tres láminas que componen la hoja incluidos sus peciólulos, los que podrían tener una menor concentración de nutrientes. Por último, también se debe incluir entre

las posibles razones de esta baja correlación a la ya mencionada incertidumbre que arrojan las determinaciones foliares de S.

La Figura 17 ilustra las asociaciones entre la respuesta a S y la relación (N/S)total determinada en la lámina del folíolo central de la última hoja expandida en el estadio V4 (Figura 17.a y b) y en los tres folíolos de la última hoja expandida en el estadio R2 (Figura 17.c y d).

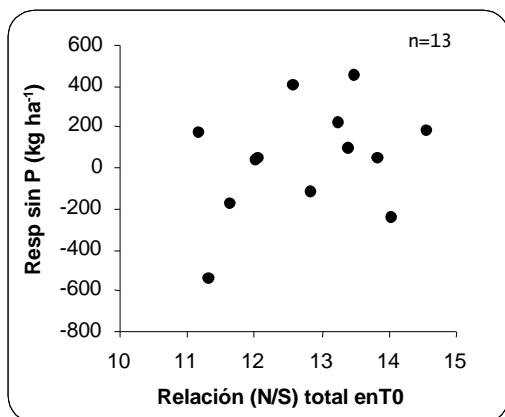


Figura 17.a

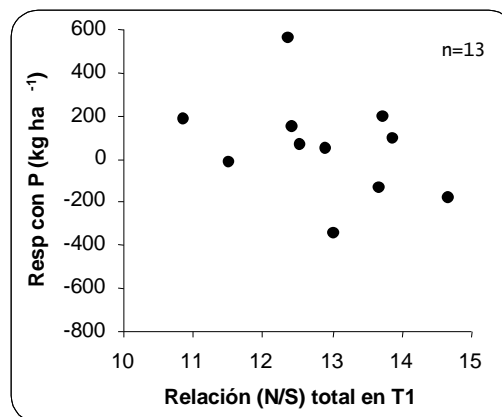


Figura 17.b

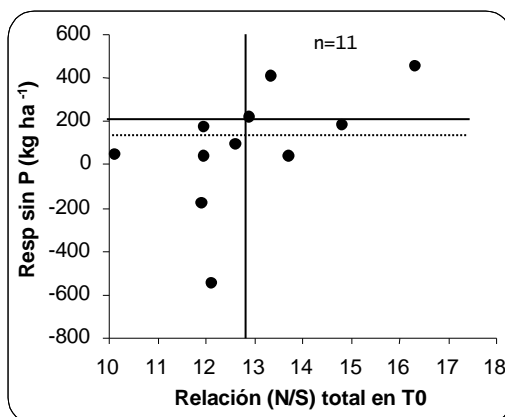


Figura 17.c

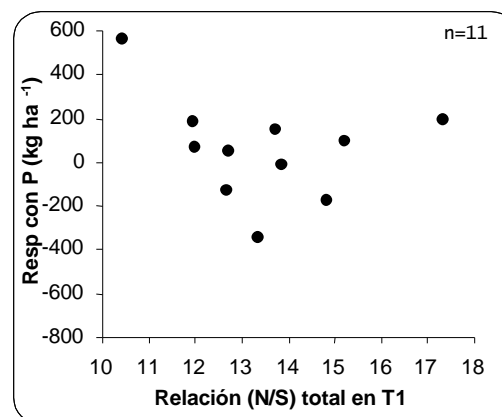


Figura 17.d

Figura 17- Asociación entre la respuesta a la aplicación de S y la relación (N/S)total en T0 en el estadio (V4-V6) (a), la relación (N/S)total en T1 en el estadio (V4-V6) (b), la relación (N/S)total en T0 en el estadio (R2-R3) (c), y la relación (N/S)total en T1 en el estadio (R2-R3) (d). Las muestras corresponden a la lámina del folíolo central de la última hoja expandida en V4, y a los tres folíolos de la última hoja expandida en R2.

A través del análisis de regresión, no se pudo establecer una asociación aceptable entre la respuesta al S y la relación (N/S)total, cualquiera sea el

momento o tratamiento analizado (Figura 17). Mediante el método de los cuadrantes de Cate y Nelson, y considerando el tratamiento T0 en el estadio R2, se logró separar correctamente situaciones de respuesta y de no respuesta al agregado de S en 9 de los 11 casos, asumiendo un valor crítico de 13/1 (Figura 17.c, línea entera). Si se delimita un umbral de respuesta ligeramente menor (línea punteada), igual número de ensayos se ubican en los cuadrantes esperados (9 de 11 casos), pero diferenciando dos poblaciones más equilibradas en cuanto a su número, lo que es coherente con el principio de este método estadístico. En cambio, no se observó una tendencia definida de la respuesta a S en relación al índice (N/S) total en T1 para el mismo estadio (Figura 17.d). De igual modo, en V4 no se pudo establecer ninguna asociación entre la respuesta y el mencionado cociente, cualquiera sea el tratamiento considerado (T0 o T1; Figuras 17.a y b, respectivamente). Martínez y Cordone (1998) y Gutiérrez Boem y Scheiner (1999) mencionan relaciones de 16/1 a 20/1, superiores a las observadas en esta red, en tratamientos testigo de ensayos que respondieron marcadamente a la fertilización azufrada.

Ninguna de las variables evaluadas mostró una clara relación con la respuesta a la fertilización. El contenido de S evaluado en la última hoja expandida (en el estado reproductivo y vegetativo), y la relación N/S total en el estadio R2 lograron diferenciar sitios con o sin respuesta a la fertilización. Sin embargo, la observación de sitios fuera de tendencia (lo que impidió establecer un ajuste por regresión) y el número pequeño de casos sobre el que se realizó este análisis no permiten presumir que los resultados de otros sitios vayan a coincidir

con estos. Es decir, los límites críticos determinados sirven a los fines de explicar la respuesta, pero es difícil asegurar que sean lo suficientemente estables como para ser usados para predecir futuros resultados. Por otra parte, no sería necesario el monitoreo de los tratamientos fertilizados para elaborar índices de suficiencia, ya que no demostraron mayor capacidad predictiva que las mediciones absolutas.

3.b- Lecturas de clorofila

Los resultados de las mediciones de clorofila realizadas en ensayos del norte de Bs As durante la campaña 2000/01 se muestran en las Tablas 23 y 24 para los estadíos V4 y R2, respectivamente.

Tabla 23- Lecturas de clorofila, significancia estadística, índices de suficiencia de S sin P (ISS sin P= Lectura T0/Lectura T2) y con agregado de P (ISS con P= Lectura T1/Lectura T3), y respuesta al agregado de S. La respuesta a S se calculó como: Respuesta a S sin agregado de P (Resp sin P)=Rendimiento T2 – Rendimiento T0; Respuesta a S con agregado de P (Resp con P)= Rendimiento T3 – Rendimiento T1. Las lecturas fueron realizadas en un estado vegetativo temprano (V4-V5) en 9 ensayos de la campaña 2000/01 ubicados en el norte de Bs As. El valor de cada tratamiento representa el promedio de 4 repeticiones y 15 lecturas por repetición. El análisis estadístico se realizó considerando como valor muestral el promedio de las 15 lecturas.

Partido/ Departamento	Tratamiento	Estadío de muestreo	Lectura promedio	Significancia estadística	ISS sin P	ISS con P	Respuesta sin P (kg ha ⁻¹)	Respuesta con P (kg ha ⁻¹)
11. General López	T0	V5	33,6	P= 0,109	0,96		84	
	T1	V5	33,9			0,98		88
	T2	V5	34,9					
	T3	V5	34,5					
12. Colón I-1	T0	V4	32,1 b	P= 0,002	0,91		214	
	T1	V4	32,2 b			0,93		-18
	T2	V4	35,2 a					
	T3	V4	34,5 a					

(continúa...)

Tabla 23- (continuación)

Partido/ Departamento	Tratamiento	Estadio de muestreo	Lectura promedio	Significancia estadística	ISS sin P	ISS con P	Respuesta sin P (kg ha⁻¹)	Respuesta con P (kg ha⁻¹)
13. Pergamino I-1	T0	V4	29,7 c	P=0,037	0,95		-152	
	T1	V4	30,2 bc			0,95		-21
	T2	V4	31,4 ab					
	T3	V4	31,9 a					
14. Pergamino I-2	T0	V4	33,6	P= 0,109	0,96		-186	
	T1	V4	33,9			0,98		46
	T2	V4	34,9					
	T3	V4	34,5					
17. Rojas	T0	V4	30,5	P= 0,955	1,00		29	
	T1	V4	30,3			1,00		63
	T2	V4	30,4					
	T3	V4	30,4					
18. Junín I-1	T0	V5	28,6 b	P= 0,059	1,00		165	
	T1	V5	29,0 b			0,96		182
	T2	V5	28,5 b					
	T3	V5	30,3 a					

(continúa...)

Tabla 23- (continuación)

Partido/ Departamento	Tratamiento	Estadío de muestreo	Lectura promedio	Significancia estadística	ISS sin P	ISS con P	Respuesta sin P (kg ha⁻¹)	Respuesta con P (kg ha⁻¹)
19. Junín I-2	T0	V4	32,6 b	P= 0,055	0,96		172	
	T1	V4	33,3 b			0,94		-185
	T2	V4	34,0 ab					
	T3	V4	35,4 a					
20. 9 de Julio I-1	T0	V4	34,0 b	P= 0,002	0,94		398	
	T1	V4	33,8 b			0,95		-353
	T2	V4	36,2 a					
	T3	V4	35,7 a					
21. 9 de Julio I-2	T0	V4	32,9 d	P= 0,001	0,95		-320	
	T1	V4	33,8 c			0,94		68
	T2	V4	34,8 b					
	T3	V4	35,8 a					

Tabla 24- Lecturas de clorofila, significancia estadística, índices de suficiencia de S sin P (ISS sin P= Lectura T0/Lectura T2) y con agregado de P (ISS con P= Lectura T1/Lectura T3), y respuesta al agregado de S. La respuesta a S se calculó como: Respuesta a S sin agregado de P (Resp sin P)=Rendimiento T2 – Rendimiento T0; Respuesta a S con agregado de P (Resp con P)= Rendimiento T3 – Rendimiento T1. Las lecturas fueron realizadas en un estado reproductivo temprano (R2) en 11 ensayos de la campaña 2000-01 ubicados en el norte de Bs As. El valor de cada tratamiento representa el promedio de 4 repeticiones y 15 lecturas por repetición. El análisis estadístico se realizó considerando como valor muestral el promedio de las 15 lecturas.

Partido/ Departamento	Tratamiento	Estadío de muestreo	Lectura promedio	Significancia estadística	ISS sin P	ISS con P	Respuesta sin P (kg ha ⁻¹)	Respuesta con P (kg ha ⁻¹)
11. General López	T0	R2	29,6 c	P=0,010	0,96		84	
	T1	R2	30,2 bc			0,95		88
	T2	R2	30,9 ab					
	T3	R2	31,8 a					
12. Colón I-1	T0	R2	30,3 b	P=0,025	0,96		214	
	T1	R2	31,0 a			0,96		-18
	T2	R2	31,5 a					
	T3	R2	31,6 a					

(continúa...)

Tabla 24- (continuación)

Partido/ Departamento	Tratamiento	Estadío de muestreo	Lectura promedio	Significancia estadística	ISS sin P	ISS con P	Respuesta sin P (kg ha⁻¹)	Respuesta con P (kg ha⁻¹)
13. Pergamino I-1	T0	R2	34,7	P=0,496	1,00		-152	
	T1	R2	35,4			1,01		-21
	T2	R2	34,9					
	T3	R2	35,2					
14. Pergamino I-2	T0	R2	32,9	P=0,109	0,96		-186	
	T1	R2	33,3			0,96		46
	T2	R2	34,3					
	T3	R2	34,7					
15. S. A. de Areco I-1	T0	R2	25,4 b	P=0,024	0,94		-425	
	T1	R2	25,9 b			0,94		108
	T2	R2	26,9 a					
	T3	R2	27,0 a					
16. S. A. de Areco I-2	T0	R2	26,7	P=0,574	1,02		42	
	T1	R2	27,6			1,03		558
	T2	R2	26,1					
	T3	R2	26,7					

(continúa...)

Tabla 24- (continuación)

Partido/ Departamento	Tratamiento	Estadío de muestreo	Lectura promedio	Significancia estadística	ISS sin P	ISS con P	Respuesta sin P (kg ha⁻¹)	Respuesta con P (kg ha⁻¹)
17. Rojas	T0	R2	25,3 c	P=0,000	0,94		29	
	T1	R2	25,6 b			0,95		63
	T2	R2	26,8 a					
	T3	R2	26,9 a					
18. Junín I-1	T0	R2	30,0	P=0,240	0,99		165	
	T1	R2	29,6			0,96		182
	T2	R2	30,3					
	T3	R2	30,7					
19. Junín I-2	T0	R2	30,0	P=0,223	0,99		172	
	T1	R2	29,6			0,96		-185
	T2	R2	30,3					
	T3	R2	30,7					
20. 9 de Julio I-1	T0	R2	30,6 c	P=0,017	0,97		398	
	T1	R2	31,7 b			0,97		-353
	T2	R2	31,6 b					
	T3	R2	32,7 a					
21. 9 de Julio I-2	T0	R2	29,7 b	P=0,005	0,97		-320	
	T1	R2	30,1 b			0,97		68

	T2	R2	30,7 a					
	T3	R2	31,1 a					

Las diferencias en las lecturas de clorofila entre los tratamientos que recibieron S respecto de los no fertilizados fueron pequeñas, tanto en términos absolutos como relativos. Aún así, en un número importante de sitios estas diferencias fueron estadísticamente significativas. El efecto de tratamiento fue significativo ($P < 0,10$) durante el primer año en 6 de los 9 sitios en el estado vegetativo, y en 6 de 11 ensayos en la medición efectuada en el período reproductivo. En todos los casos, las diferencias estadísticamente significativas fueron favorables a los tratamientos fertilizados, al menos a través de alguna de las dos comparaciones: T2 vs T0 o T3 vs T1. Cuatro experimentos en el estado vegetativo, y 5 experimentos en el estado reproductivo presentaron diferencias en ambas comparaciones. Tal grado de consistencia puede deberse a que el valor individual de cada tratamiento surge del promedio de 15 lecturas (submuestras) y, por lo tanto, el valor observado constituiría una buena aproximación al valor esperado para cada tratamiento.

En la Figura 18 se presenta la relación entre la respuesta al agregado de S y el ISS, tanto en el período vegetativo como reproductivo.

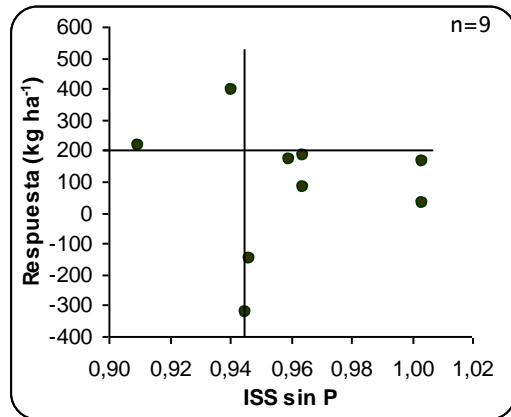


Figura 18.a

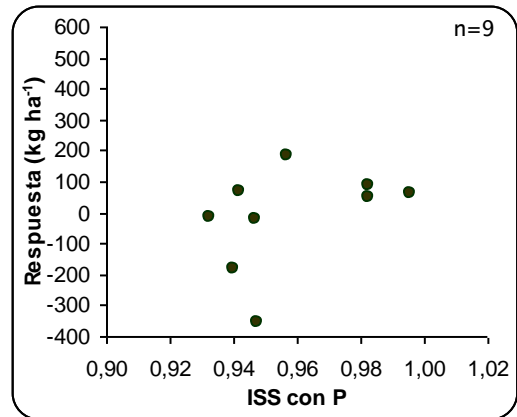


Figura 18.b

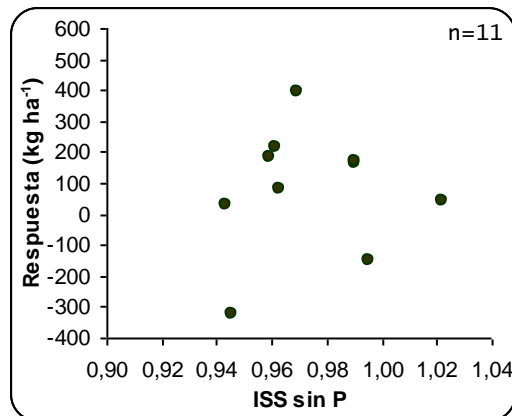


Figura 18.c

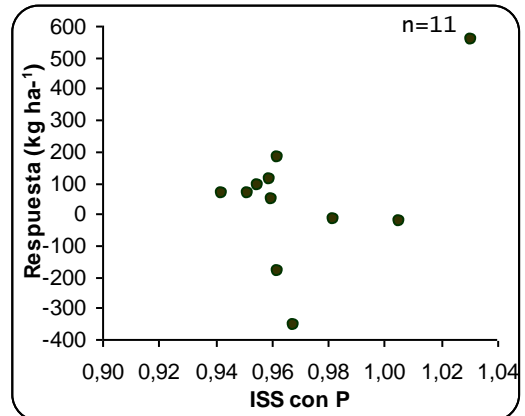


Figura 18.d

Figura 18- Asociación entre la respuesta a la fertilización azufrada y el índice de suficiencia de S (ISS) con o sin agregado de P. El ISS corresponde a un estado vegetativo temprano (V4-V5; a y b) o reproductivo (R2; c y d). Ensayos campaña 2000/01.

No se pudo establecer un modelo de regresión que explicara satisfactoriamente la respuesta a S. Por medio de un análisis de cuadrantes, las lecturas de clorofila anticiparon la respuesta a la fertilización solamente cuando se consideraron los tratamientos sin aplicación de P en el estado vegetativo cercano a

cuatro hojas expandidas (Figura 18.a). Por el contrario, no se logró predecir la respuesta con las mediciones en R2 de los mismos tratamientos (Figura 18.c), ni con los ISS calculados para los tratamientos con agregado de P en ambos estadios (Figura 18.b y d). Como ya fuera mencionado, las diferencias registradas en las mediciones entre los tratamientos fertilizados y no fertilizados con S fueron estadísticamente consistente en la mayoría de los casos pero de poca magnitud en valores absolutos, lo que provocó que los ISS nunca alcanzaran un valor inferior a 0,90. Un margen de diferenciación tan estrecho dificultaría la elaboración de un método de diagnóstico basado únicamente en estos índices, ya que los valores que indicarían déficit o suficiencia nutricional serían muy similares y, en consecuencia, no permitirían discriminar con precisión el efecto fertilidad del lote del error experimental, por pequeño que éste fuera.

Los resultados de las mediciones de clorofila tomadas en los ensayos de la campaña 2001/02 se detallan en las Tablas 25 y 26, para los estadios V4 y R2, respectivamente.

Tabla 25- Lecturas de clorofila, significancia estadística, índices de suficiencia de S sin P (ISS sin P= Lectura T0/Lectura T2) y con agregado de P (ISS con P= Lectura T1/Lectura T3), y respuesta al agregado de S. La respuesta a S se calculó como: Respuesta a S sin agregado de P (Resp sin P)=Rendimiento T2 – Rendimiento T0; Respuesta a S con agregado de P (Resp con P)= Rendimiento T3 – Rendimiento T1. Las lecturas fueron realizadas en un estado vegetativo temprano (V4) en 4 ensayos de la campaña 2001/02 ubicados en el norte de Bs As. El valor de cada tratamiento representa el promedio de 4 repeticiones y 15 lecturas por repetición. El análisis estadístico se realizó considerando como valor muestral el promedio de las 15 lecturas.

Partido/ Departamento	Tratamiento	Estadío de muestreo	Lectura promedio	Significancia estadística	ISS sin P	ISS con P	Respuesta sin P (kg ha ⁻¹)	Respuesta con P (kg ha ⁻¹)
39. Colón II-1	T0	V4	36,9 a	P=0,014	1,05		266	
	T1	V4	34,1 c			0,94		543
	T2	V4	35,3 bc					
	T3	V4	36,3 ab					
40. S. A. de Areco II-1	T0	V4	31,3 b	P=0,000	0,93		27	
	T1	V4	30,4 c			0,91		175
	T2	V4	33,6 a					
	T3	V4	33,4 a					

(continúa...)

Tabla 25- (continuación)

Partido/ Departamento	Tratamiento	Estadío de muestreo	Lectura promedio	Significancia estadística	ISS sin P	ISS con P	Respuesta sin P (kg ha⁻¹)	Respuesta con P (kg ha⁻¹)
41. Junín II-1	T0	V4	30,8 b	P=0,013	0,95	0,99	422	199
	T1	V4	31,9 a					
	T2	V4	32,3 a					
	T3	V4	32,2 a					

Tabla 26- Lecturas de clorofila, significancia estadística, índices de suficiencia de S sin P (ISS sin P= Lectura T0/Lectura T2) y con agregado de P (ISS con P= Lectura T1/Lectura T3), y respuesta al agregado de S. La respuesta a S se calculó como: Respuesta a S sin agregado de P (Resp sin P)=Rendimiento T2 – Rendimiento T0; Respuesta a S con agregado de P (Resp con P)= Rendimiento T3 – Rendimiento T1. Las lecturas fueron realizadas en un estado reproductivo temprano (R2) en 5 ensayos de la campaña 2001/02 ubicados en el norte de Bs As. El valor de cada tratamiento representa el promedio de 4 repeticiones y 15 lecturas por repetición. El análisis estadístico se realizó considerando como valor muestral el promedio de las 15 lecturas.

Partido/ Departamento	Tratamiento	Estado de muestreo	Lectura promedio	Significancia estadística	ISS sin P	ISS con P	Respuesta sin P (kg ha ⁻¹)	Respuesta con P (kg ha ⁻¹)
39. Colón II-1	T0	R2	32,4	P=0,531	1,00		266	
	T1	R2	32,1			0,97		543
	T2	R2	32,3					
	T3	R2	33,0					
40. S. A. de Areco II-1	T0	R2	30,2	P=0,677	1,00		27	
	T1	R2	30,5			1,00		175
	T2	R2	30,1					
	T3	R2	30,6					

(continúa...)

Tabla 26- (continuación)

Partido/ Departamento	Tratamiento	Estadío de muestreo	Lectura promedio	Significancia estadística	ISS sin P	ISS con P	Respuesta sin P (kg ha⁻¹)	Respuesta con P (kg ha⁻¹)
41. Junín II-1	T0	R2	29,7	P=0,565	0,99		422	
	T1	R2	29,6			1,00		199
	T2	R2	30,0					
	T3	R2	29,6					
43. 9 de Julio II-1	T0	R2	28,8 b	P=0,028	0,98		378	
	T1	R2	29,1 b			0,95		359
	T2	R2	29,4 b					
	T3	R2	30,7 a					

En dos de los tres ensayos evaluados en el estadio V4 se observaron diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,10$) en las lecturas de clorofila (Tabla 25). En todos se determinaron diferencias a favor de los tratamientos fertilizados en al menos una de las comparaciones, y en uno de estos experimentos las diferencias se observaron entre ambas comparaciones (T2 vs T0 y T3 vs T1). En el ensayo realizado en Colón, la diferencia significativa a favor de T0 (testigo) respecto de T2 (tratamiento fertilizado) no tiene explicación aparente. En el estado R2 sólo se detectaron diferencias significativas en uno de los ensayos evaluados, al comparar el tratamiento T3 con el T1 (Tabla 26).

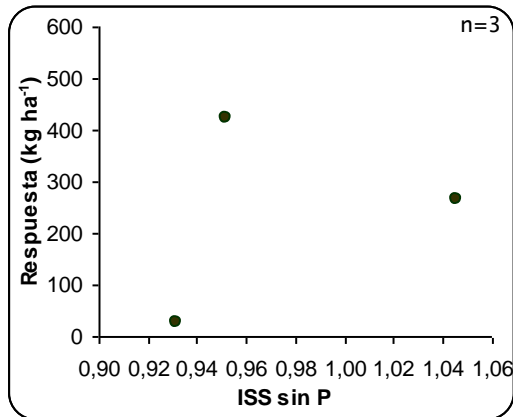


Figura 19.a

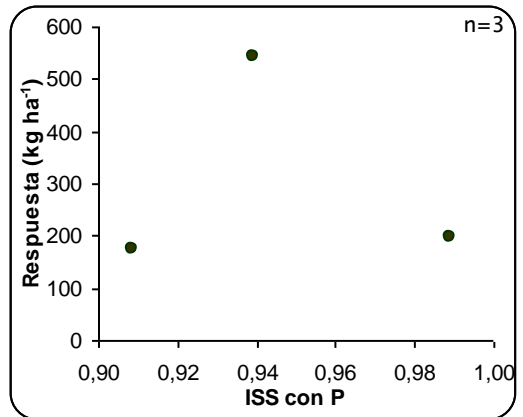


Figura 19.b

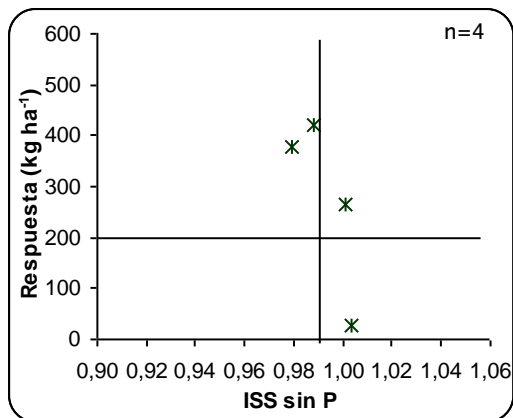


Figura 19.c

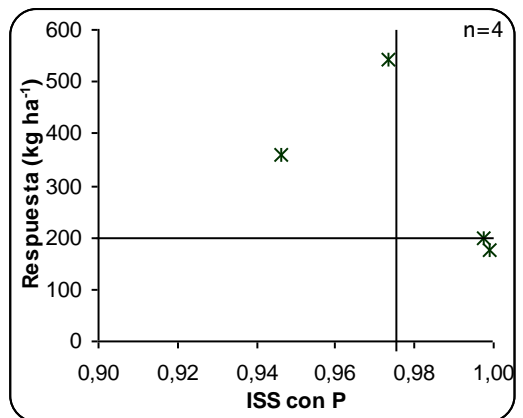


Figura 19.d

Figura 19- Asociación entre la respuesta a la fertilización azufrada y el índice de suficiencia de S (ISS) con o sin agregado de P. El ISS corresponde a los estadios V4 (a y b) y R2 (c y d). Ensayos campaña 2001/02.

Si bien se trata de un juego de datos extremadamente reducido ($n=3$) como para realizar un análisis sólido de la asociación entre variables, en el estadio V4 no se observó ninguna tendencia definida que permitiera explicar la respuesta a la fertilización azufrada a partir del ISS (Figuras 19.a y 19.b). En R2, en cambio, si

bien no se pudo establecer un modelo de regresión que permitiera predecir la respuesta a S, la aplicación del método de los cuadrantes permitió separar sitios de respuesta y de no respuesta al nutriente en base a un umbral de 0,99 para los tratamientos sin P (Figura 19.c), y de 0,97-0,98 para los tratamientos con agregado de P (Figura 19.d) como fertilizante de base. Estas asociaciones tienen valor explicativo más que predictivo, ya que los umbrales obtenidos fueron demasiado altos y, por ende, los ISS serían poco sensibles como para permitir diferenciar anticipadamente sitios con y sin respuesta a la fertilización azufrada. Estos resultados, sumados al ya mencionado escaso número de sitios evaluados, no posibilitan confirmar ni tampoco invalidar las tendencias observadas durante el primer año de ensayos.

Comparando ambos momentos de medición, se han logrado establecer asociaciones con la respuesta al S tanto en el período vegetativo (Figura 18.a) como en el reproductivo (Figura 19 c y d). La posibilidad de realizar esta evaluación nutricional en un estado vegetativo temprano facilitaría la puesta en práctica de un método de diagnóstico basado en determinaciones de planta, especialmente desde el punto de vista operativo. A diferencia de estos resultados, Bergh et al. (1999) y Sainz Rozas y Echeverría (1999) han observado un incremento en la precisión de las estimaciones realizadas en el período reproductivo para N en cultivos de gramíneas. Esta discrepancia podría deberse a que la fracción de nutrientes acumuladas hasta la floración es relativamente pequeña en Soja comparada con otros cultivos como Maíz o Trigo y, en

consecuencia, la calidad de la estimación en dicho período no debería cambiar sustancialmente respecto de un estado vegetativo más temprano.

En base a lo antes comentado, podría sugerirse que el contenido de S en T0, la relación (N/S) total en T0 y el ISS determinado a través del medidor de clorofila SPAD 502 serían los indicadores de planta más apropiados para explicar la respuesta a la fertilización azufrada en condiciones de no interferencia de los mencionados indicadores por fertilización con otros nutrientes. Otras determinaciones mostraron mayor variabilidad y menor asociación con la respuesta. Un aspecto adicional a considerar en la valoración de los indicadores foliares es que los mismos plantean dificultades de tipo metodológico, ya que es necesario uniformar al máximo el órgano seleccionado (ej: lámina foliar con pecíolo o sin pecíolo), el estado fenológico en el que se realizan los muestreos y aún la edad de la hoja a muestrear. A modo de ejemplo, a través de la observación visual o del medidor de clorofila es fácilmente detectable el cambio de coloración que ocurre en una lámina foliar cuando, estando la hoja ya expandida, se encuentra todavía en crecimiento o ha alcanzado su tamaño final. La realización de un muestreo estandarizado es, sin embargo, algo difícil de implementar, ya que la identificación de un estado fenológico o del tamaño final de una hoja puede diferir levemente entre los distintos observadores, y hacen a la herramienta menos recomendable para ser difundida en forma generalizada con fines de diagnóstico. Su empleo generaría, además, la necesidad de seguir con frecuencia la fenología del cultivo, lo cual resultaría poco práctico especialmente para productores y asesores a cargo de grandes superficies o de varios lotes separados por distancias

importantes. Estos factores restarían confiabilidad y/o practicidad a los indicadores de planta como criterio único de evaluación de la fertilidad azufrada. Sin embargo, los mismos podrían prestar utilidad como herramientas de monitoreo y, eventualmente, servirían para efectuar correcciones de la recomendación de fertilización implementada al momento de la siembra. Dicho ajuste sería factible teniendo en cuenta que la acumulación de S en el cultivo de Soja alcanza tasas importantes recién a partir de R2, tal como se ha mencionado en el **Capítulo III**.

4- CONCLUSIONES

En un marco general de un escaso número de sitios con respuesta a la fertilización azufrada, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

➤ La concentración de S evaluada en la lámina del folíolo central de la última hoja expandida, el ISS determinado mediante el uso del clorofilómetro Minolta Spad 502, en ambos casos en un estado vegetativo temprano, y la relación N/S total en el estado reproductivo, lograron explicar la respuesta a la fertilización azufrada, en todos los casos considerando tratamientos sin agregado de P. Las lecturas de clorofila mostraron una buena consistencia en las observaciones, lo que se tradujo en una frecuente diferenciación estadísticamente significativa entre tratamientos. Como valores tentativos, podría sugerirse un rango de concentraciones críticas de 0,38 a 0,40 % de S para la evaluación química, y un ISS de 0,94 para las lecturas de clorofila. El límite crítico determinado para la relación N/S total fue de 13/1, para los estadios R2-R3. La expresión de la concentración de S foliar a través de un IS%S presentó un menor poder predictivo

que la utilización de concentraciones absolutas y requiere la determinación de S en una franja o tratamiento fertilizado con ese propósito.

- Las lecturas de clorofila realizadas durante la campaña 2001/02 no aportaron información adicional de valor, tal como sucediera con los análisis de suelo de este segundo año de experimentación (ver **Capítulo IV**). Mientras que en el estadio V4 no lograron anticipar la respuesta a S, en R2 los niveles críticos que separaron sitios con y sin respuesta a la fertilización fueron demasiado elevados, reflejando la escasas sensibilidad de los índices de suficiencia evaluados.
- No se encontró relación entre los valores de las concentraciones foliares de S evaluadas en V4 y en R2.
- Los resultados presentados responden a los objetivos planteados en el **Capítulo I**, al haber evaluado variables de planta con fines de diagnóstico, y haber propuesto umbrales críticos para aquellas que demostraron mayor valor predictivo. Esto permite también comprobar la hipótesis propuesta sobre la posibilidad de predecir la respuesta a la fertilización azufrada basándose en variables de cultivo. Sin embargo, las evaluaciones foliares pueden resultar poco prácticas y/o confiables como criterio único de diagnóstico, ya que requieren de una estricta estandarización con el procedimiento de muestreo, que en muchos casos sería difícil de ser cumplimentada por usuarios poco familiarizados con la metodología. Sin embargo, podrían ser de utilidad para el monitoreo del estado nutricional del cultivo, y para efectuar correcciones de la recomendación de fertilización implementada a la siembra.

CAPITULO VI

CONSIDERACIONES FINALES SOBRE EL DIAGNOSTICO DE
FERTILIDAD AZUFRADA EN SOJA

1- ACERCA DE LA RESPUESTA A S EN SOJA

A pesar de las reiteradas situaciones de respuesta positiva a S que han sido observadas en nuestro país, y que ya fueran mencionadas en el **Capítulo I**, y a la amplia difusión que está tomando la práctica de la fertilización con este nutriente, la frecuencia de sitios con respuesta en los dos años de la red evaluada en esta tesis no superó el 20 % de los ensayos, considerando respuestas estadísticamente significativas ($P < 0,10$). Una primera explicación para este comportamiento es que en las condiciones de la región pampeana los requerimientos de S de la Soja, tal como se detalla en el **Capítulo III** de este trabajo, oscilarían entre 2,7 y 4,7 kg de S t^{-1} de grano, los cuales son bastante inferiores al valor comúnmente aceptado de 7 kg t^{-1} . Adicionalmente a estas bajas necesidades, debe considerarse que el S se mineraliza en el suelo hasta relaciones C:S muy bajas, alcanzando en términos relativos valores menores a los de otros nutrientes (Mc Laren y Swift, 1977). Por lo tanto, un suelo degradado, con bajo nivel de MO, puede continuar mineralizando S aún después de haber cesado la liberación de N. Si, por otro lado, se tiene presente que la Soja posee umbrales de respuesta a la fertilización más bajos que otros cultivos (Echeverría y García, 1998), se puede finalmente concluir que solamente podrían esperarse respuestas al agregado de S en Soja bajo situaciones de degradación muy marcadas. Los ambientes con esta condición son comunes en el centro-sur de Santa Fe y cada vez más frecuentes en el norte y centro de Buenos Aires, lo cual contribuiría a explicar la mayor ocurrencia de sitios con respuesta que se encontró en esta área central. Otras regiones menos intensivamente explotadas y con inferiores niveles de exportación histórica de

nutrientes presentarían un grado de deficiencia menor, aunque en algunas de ellas, como en la provincia de Córdoba, se han observado también sitios con respuesta, tal como mencionan Galarza et al. (2000).

2- ACERCA DEL DIAGNÓSTICO DE FERTILIDAD AZUFRADA EN BASE A VARIABLES DE SUELO Y PLANTA

Las variables de suelo evaluadas a la siembra demostraron, en general, tener mejor valor predictivo que las variables de planta y los estudios de mineralización. Las ventajas de un método de diagnóstico basado en análisis de suelo son considerables, tanto desde el punto de vista práctico como económico, y ya han sido mencionadas en el **Capítulo IV**. La adopción de una herramienta de estas características se vería facilitada por el conocimiento y familiaridad existente con relación al muestreo de suelos, la posibilidad de utilizar la misma muestra para el diagnóstico de deficiencias de P, y la rápida disponibilidad de los resultados. Además, un método basado en análisis de suelo es más fácilmente adaptable a otros cultivos, comparado con una relación entre nutrientes o con la concentración absoluta de un nutriente en un órgano vegetal. Sin embargo, con los resultados de este trabajo no se logró predecir la respuesta a S en base a un solo indicador edáfico, tal como sucede con otros nutrientes como P (Ferraris et al., 2002). Fue necesario establecer un modelo aditivo que integró la disponibilidad inicial de S en el suelo y la capacidad para mineralizar el nutriente a partir de las fracciones orgánicas, representadas por la dotación de S-sulfatos (0-60 cm) y la relación MO/arcilla, respectivamente. Estas variables fueron seleccionadas a través de un procedimiento de regresión lineal múltiple, dando lugar a modelos

que permitieron las mejores predicciones de la respuesta a S, tanto en la red completa como en un grupo de ensayos seleccionados. Aparte de su valor predictivo, las mismas reunirían también las ventajas de ser fácilmente cuantificables y a un bajo costo, requiriendo solamente la determinación de MO y de S-sulfatos, ya que los datos de textura son obtenidos de la descripción de la serie correspondiente en las cartas de suelos. La determinación textural en laboratorio podría mejorar aún más la precisión de los modelos. La disponibilidad de S-sulfatos hasta 60 cm podría estimarse a partir del valor medido en la capa 0-20 cm. Alvarez y Alvarez (2000) observaron una buena correlación entre la disponibilidad de nitratos a 0-20 y a 0-60 cm. Los nitratos son más móviles que los sulfatos en el perfil, por lo cual sería esperable encontrar una relación similar o aún más consistente en el caso de S. La asociación hallada entre los valores de S-sulfatos a 0-20 y a 0-60 cm en los dos años de la red se presenta en la Figura 20.

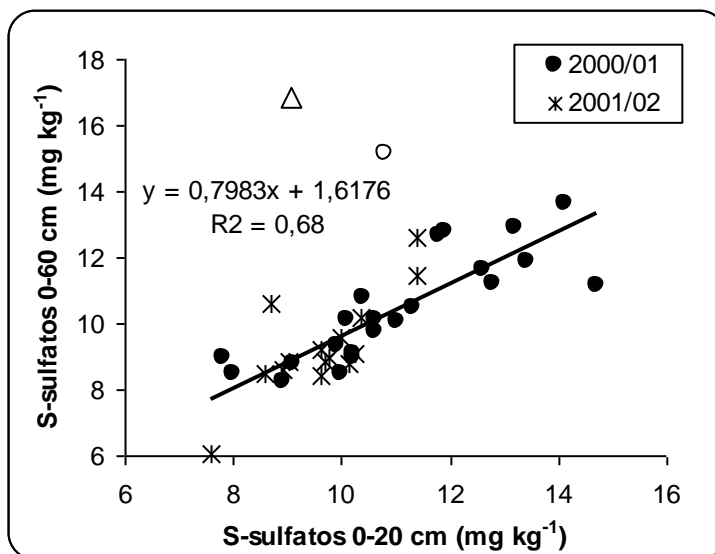


Figura 20- Asociación entre la concentración de S-sulfatos en el suelo a 0-20 y a 0-60 cm de profundidad. Ensayos campaña 2000/01 y 2001/02.

Para el análisis de los datos, se excluyeron los ensayos S. A. de Areco I-1, Maracó, Catriló I-1, Catriló I-2 y Capital I-1 (campaña 2000/01), y S. A. de Areco II-1 (campaña 2001/02), en todos los casos por no disponerse de las determinaciones de S-sulfatos para las profundidades evaluadas. Los sitios Paraná I-2 y Tandil II-1 (símbolos vacíos en la Figura 20) tampoco fueron considerados en el análisis, ya que se mostraron fuera de la tendencia central, presentando un valor residual estudentizado mayor a dos cuando se los incluyó en la regresión. Esto se explica por la elevada disponibilidad de S-sulfatos a 40-60 cm que se determinó en estos ensayos, sin que la misma tenga una explicación aparente.

Se observa una buena asociación entre S-sulfatos 0-20 y 0-60 cm, la cual sería suficientemente consistente como para afirmar que ambas variables se encuentran correlacionadas, y que sería posible estimar la disponibilidad en un espesor mayor a partir de la concentración en la capa superficial. El grado de

asociación y el coeficiente a utilizar para estimar una variable sobre la base de la otra deberían estudiarse con mayor profundidad. Esto habitualmente se realiza utilizando disponibilidades absolutas expresadas en kg ha^{-1} para lo cual se necesita además la determinación de la densidad aparente de cada uno de los suelos, propiedad que no fue medida en estos ensayos, por lo que dicho análisis excede los alcances de este trabajo.

Como contrapartida, la determinación de S-sulfatos en suelo presenta algunos inconvenientes metodológicos. En primer lugar, no existe acuerdo entre los laboratorios comerciales o de investigación en cuanto al extractante a utilizar. Además de acetato de amonio y fosfato diácido de potasio, utilizados en esta tesis, se emplean otros como cloruro de potasio calentado a 40°C , fosfato de calcio e inclusive agua (Lisle et al., 1994). En algunas regiones de Estados Unidos se emplean otros menos comunes, como cloruro de litio y cloruro de amonio (Johnson, 1986). Por otra parte, la determinación turbidimétrica, que es el método de cuantificación comúnmente utilizado, ha demostrado una relativa precisión. En esta metodología, se precipitan los iones sulfato del extracto con dicloruro de bario, y la suspensión se lee con un espectrofotómetro. El método turbidimétrico es simple y rápido, pero requiere la formación de una fase sólida uniforme de sulfato de bario, sin agregación coloidal de esta sustancia ni precipitación de iones, lo cual en la práctica es muy difícil de lograr. Los valores obtenidos muestran mayor variabilidad cuando las cantidades extraídas de sulfato son pequeñas (Sillem, 1998). La presencia de coloides orgánicos en el extracto dificulta la precipitación, produciendo subestimación del ión sulfato cuando se encuentra en baja

concentración (menor a 10 ppm), y sobreestimaciones en altas concentraciones del mismo (Anderson et al, 1992). Estos autores han mencionado que la confiabilidad del método mejora estabilizando la solución con goma arábica o carbón activado, manteniendo luego la concentración a través de diluciones. No obstante, tampoco existe acuerdo en cuanto a cual de ellos utilizar ni en que cantidad deberían ser agregados. Otros métodos más sofisticados como la espectrometría de absorción atómica o la espectrometría de absorción atómica con cupla de plasma (ICP) han demostrado mayor precisión (Zhao y Mc Grath, 1994), pero el elevado costo del instrumental necesario hace muy poco probable su adopción comercial.

Las incubaciones de suelo no demostraron poseer una mejor aptitud que las evaluaciones de suelo a la siembra. Sin embargo, presentaron una interesante asociación con la respuesta a S y también estuvieron correlacionadas con otras variables de suelo que estiman la mineralización de S-sulfatos. Asimismo, el rango de valores determinados mostró una gran amplitud, lo cual permitió establecer diferencias importantes entre los suelos evaluados. Todos estos atributos justifican que se continúe evaluando su utilidad como herramienta de diagnóstico. Diversas variantes metodológicas podrían estudiarse con el propósito de mejorar el valor predictivo y la practicidad de estas incubaciones, en aspectos tales como el tiempo de incubación, el tamaño de la muestra, y la temperatura y humedad durante el proceso de incubación, además de los extractantes utilizados. El presente estudio sólo constituye una primera aproximación con el objetivo de evaluar esta herramienta.

Las evaluaciones foliares reflejaron un grado de asociación variable con la respuesta a S. Quedó expresada la necesidad de estandarizar estrictamente la metodología de muestreo, lo cual constituye un inconveniente para su utilización a campo, donde la interpretación de alguna de las restricciones puede estar influenciada por el observador. En líneas generales, no mostraron suficiente capacidad para identificar ambientes bien provistos (sin respuesta) de ambientes deficitarios (con respuesta) en S, aún cuando fueran analizados por el método “menos exigente” de Cate y Nelson (1965). Sin embargo, serían de utilidad como herramientas de monitoreo y eventualmente servirían para efectuar correcciones a la recomendación de fertilización implementada al momento de la siembra. Este ajuste durante el ciclo sería factible considerando la pequeña fracción de S que el cultivo acumula hasta las primeras etapas del período reproductivo, tal como se mostrara en el **Capítulo III** de esta tesis. Los análisis de planta serían particularmente útiles para estudios específicos en los que se busque comparar distintos tratamientos basándose en la eficiencia de absorción del nutriente, o en estudios de calidad o contaminación. En estos casos los muestreos suelen ser realizados por una o pocas personas y las restricciones metodológicas son fáciles de cumplimentar. Dentro de las variables evaluadas, la concentración absoluta de S en hoja es una determinación directa que demostró ser de razonable confiabilidad, al menos en las situaciones en que el cultivo no fue fertilizado con P. En este sentido, cuando el contenido de S en láminas foliares fue superior a 0,40 % se observó una baja probabilidad de respuesta a la fertilización. La construcción de índices relativos no se justificaría, ya que no mejoraron el valor

predictivo de las determinaciones absolutas. En cambio, la Relación (N/S) total separó adecuadamente sitios de respuesta y no respuesta a la fertilización en un valor crítico de 13/1, aunque sólo se pudo establecer dicha separación para el estadio R2-R3 en tratamientos sin agregado de P. Las lecturas de clorofila serían otra herramienta de monitoreo adecuada, siempre que se asegure una elevada intensidad de muestreo y se fertilice una franja del lote a la siembra para referenciar el sector no fertilizado. Una ventaja de esta técnica es la disponibilidad inmediata de los resultados, además de su bajo costo, si se amortiza la adquisición del medidor de clorofila en una gran cantidad de lotes o entre varios productores.

Sobre la base de estos resultados, se propone al modelo que integra la relación MO/arcilla y la disponibilidad de S-sulfatos a 0-60 cm de profundidad como la herramienta más apropiada para predecir la respuesta a la fertilización azufrada en Soja. La determinación foliar de S, (N/S) o las lecturas de clorofila servirían para ajustar el plan original de fertilización o, eventualmente, podrían reemplazar al modelo propuesto en caso de no poder cuantificar las variables de suelo previo a la siembra.

3- ACERCA DEL ALCANCE DE LOS RESULTADOS PRESENTADOS

Un aspecto importante de este trabajo reside en haber explorado en forma sistemática la respuesta a la fertilización azufrada en la mayor parte de las regiones sojeras, evaluando posibles deficiencias del nutriente en cada una de estas zonas. Las regiones difirieron en cuanto a la frecuencia de respuesta observada, aún cuando las relaciones encontradas se establecieron en base a los datos de toda la red y son válidos para toda esa población. El mayor número de

situaciones de deficiencia de S y respuesta a la fertilización se encontró en ambientes del centro-norte de Buenos Aires y el centro-sur de Santa Fe. En las provincias de Córdoba y La Pampa la respuesta fue errática y poco frecuente. Más aún, en la provincia de Entre Ríos, ninguno de los ensayos tuvo respuesta positiva a la fertilización con S, lo que despierta un interrogante sobre el potencial de respuesta al nutriente en la región. Una situación similar se presenta en el sudeste bonaerense, donde suelos de elevada relación MO/arcilla serían capaces de mineralizar todo el S necesario para sostener altos rendimientos sin necesidad de recurrir a la fertilización. Relaciones similares se han observado en el oeste de Buenos Aires y explicarían la ausencia de respuesta en esta zona, pero a diferencia del sudeste donde el cociente MO/arcilla está influenciado por el elevado tenor de MO de sus suelos, en el oeste el bajo porcentaje de arcilla es el factor determinante.

También resulta de importancia haber identificado las variables que más claramente se relacionan con la respuesta a la fertilización y en las cuales debería basarse la decisión de fertilizar la Soja con S. La limitada frecuencia y magnitud de las respuestas observadas impiden establecer un modelo de regresión lo suficientemente estable como para definir umbrales críticos o estimar el incremento de rendimiento esperable con el cambio en el valor de las variables. El aumento en la proporción de sitios con respuesta permitirá clarificar estos interrogantes en el futuro, a la vez que sería de esperar que los indicadores propuestos expliquen la respuesta a S con un grado de ajuste aún mejor al obtenido en esta red. Una evolución similar siguió el diagnóstico de deficiencias

de otros nutrientes, como es el caso del N en cereales, para el cual partiendo de tendencias menos consistentes que las presentadas en este trabajo se llegaron a elaborar criterios de recomendación razonablemente ajustados al aumentar el conocimiento respecto de la profundidad y el momento de muestreo apropiados para realizar los análisis, y la relación existente entre la dinámica del nutriente y las condiciones ambientales (especialmente la disponibilidad hídrica) en las que se desarrolla el cultivo.

4- ACERCA DEL DESARROLLO FUTURO DE LA FERTILIZACIÓN AZUFRADA EN SOJA







La superficie sembrada con Soja aumenta año tras año en la Argentina y pareciera no tener límites, a la vez que se reduce u ocasionalmente se mantiene el área de siembra de los cereales, que son los cultivos habitualmente fertilizados. En este contexto, los nutrientes necesarios para que los suelos se mantengan productivos deberán ser aplicados cada vez más frecuentemente a la Soja. Sin embargo, resta aún transitar un largo camino en el estudio de la fertilización azufrada en Soja. Próximos trabajos podrán centrarse en validar el modelo de diagnóstico propuesto y ajustar el valor de los coeficientes que acompañan a las variables jerarquizadas en esta tesis, o explorar la utilidad de otras técnicas aquí no contempladas. Por otro lado, deberán definirse curvas de respuesta que permitan identificar dosis óptimas desde el punto de vista físico y económico de acuerdo con el nivel de deficiencia determinado en cada sitio. Paralelamente, será también necesario profundizar la generación de información referida a la tecnología de fertilización con S, para ajustar el manejo en aspectos tales como el









momento y la forma de aplicación, y el comportamiento de diferentes fuentes y sobre todo de formas químicas del nutriente. Este trabajo pretende ser un paso más hacia el objetivo de hacer más eficiente la fertilización, la práctica de manejo que quizás marque el mayor salto en la productividad del cultivo de Soja en la próxima década.








BIBLIOGRAFIA CITADA








- ☞ Agrawal, H.P. and A.K. Mishra. 1994. Sulphur nutrition of Soybean. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*, 25: 1303-1312.
- ☞ Ajwa, H.A. and M.A. Tabatabai. 1993. Comparison of some methods for determination of Sulfate in soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*, 24: 1817-1832.
- ☞ Alvarez, R. and R. Lavado. 1998. Climate, organic matter and clay content relationship in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma* 83: 127-141.
- ☞ Alvarez C. y R. Alvarez. 2000. Correlación entre las concentraciones de nitrato en suelo a distintas profundidades: análisis de datos publicados. En: *Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (CD Rom)*, Mar del Plata, Buenos Aires.
- ☞ Anderson, A.J. and D. Spencer. 1950. Sulphur in Nitrogen metabolism of legumes and non-legumes. *Australian Journal Science Research, Ser. B* 3: 431-449.
- ☞ Anderson, G., R. Lefroy, N. Chinoim and G. Blair. 1992. Soil Sulphur Testing. *Sulphur in Agriculture*, 16: 6-14.
- ☞ Andrade, F., L. Aguirrezábal y R. Rizzalli. 2000. Crecimiento y rendimiento comparados. pp 61-96. En: *Andrade, F. y V. Sadras (eds.). Bases para el manejo del Maíz, el Girasol y la Soja*. INTA EEA Balcarce – Fac. de Ciencias Agrarias UNMP, Balcarce, Buenos Aires.
- ☞ Andrade, F., A. Cirilo, S. Uhart y M. Otegui. 1996. *Ecofisiología del cultivo de Maíz*. Editorial La Barrosa, Balcarce, Buenos Aires. 292 p.







- ☞ Andriulo, A. J. Galantini y F. Abrego. 1996. Exportación y balance edáfico de nutrientes después de 80 años de agricultura continua. Carpeta de Producción Vegetal, Tomo XIV, Generalidades, Información N° 147. INTA EEA Pergamino, 10 p .
- ☞ Azcona, J. y M. Shang. 1997. Uso en la alimentación humana y animal. Alimentación animal. No rumiantes. pp. 430-434. En: Giorda, L. y H. Baigorri (eds.). El cultivo de Soja en Argentina. INTA Centro Regional Córdoba-Editar.
- ☞ Beaton, J.D. y Soper, R.J. 1986. Plant response to Sulfur in Western Canada. pp. 375-403. En: M.A. Tabatabai (ed.). Sulphur in agriculture. ASA-CSSA-SSSA, Madison, USA.
- ☞ Bergh, R., A. Agustín, A. Quattrochio y M. Zamora. 1999. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada para calidad en Trigo candeal (Campaña 98/99). pp 21-30. En: Seminario sobre diagnóstico de deficiencias de Nitrógeno, Fósforo y Azufre en cultivos de la región Pampeana. INTA EEA Balcarce.
- ☞ Blackmer, A., R. Voss y A. Mallarino. 1999. Fertilización nitrogenada de Maíz en Iowa. Agromercado, Año 19, N°183 (Dic 99/Enero 2000), pp 75-79.
- ☞ Blair, G., R. Lefroy, N. Chinoim and G. Anderson. 1993. Soil Sulphur testing. Plant and Soil, 155/156: 383-386.
- ☞ Blanchar, R.W., G. Rehm and A.C. Caldwell. 1965. Sulphur in plant materials by digestion with nitric and percloric acid. Proc. Soil Sci. Soc. Am., 29:71-72.









-  Burke, J.J., P. Holloway and M.J. Dalling. 1986. The effect of Sulfur deficiency on the organization and photosintetic capability of Wheat leaves. *J. Plant Physiology*, 125: 371-375.
-  Cakmak, I. and H. Marschner. 1992. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase and glutathione reductase in bean leaves. *Plant Physiology*, 98: 1222-1227.
-  Cate, R.B. y L.A. Nelson. 1965. A rapid method for correlation of soil test analysis with plant response data. *North Carolina Agric. Exp. Sta. International Soil Testing Series, Tech. Bul N°1*.
-  Caviglia, O.P., O.F. Papparotti y P.A. Barbagelata. 1999. Ensayos de respuesta a la aplicación de un fertilizante azufrado en los cultivos de Trigo, Soja y Maíz en el centro-oeste de Entre Ríos. pp 112-128. En: Seminario sobre diagnóstico de deficiencias de Nitrógeno, Fósforo y Azufre en cultivos de la región Pampeana. INTA EEA Balcarce.
-  Cuniberti, M. 1997. Uso en la alimentación humana y animal. Alimentación y nutrición humana. pp. 425-430. En: Giorda, L. y H. Baigorri. (eds.). *El cultivo de Soja en Argentina*. INTA Centro Regional Córdoba-Editar.
-  Darwich, N. 1998. Manual de fertilidad de suelos y uso de fertilizantes. Segunda edición, SEAG y P- INTA- Enichem Agricultura, 182 p. Mar del Plata, Buenos Aires.

-  Darwich, N. 1999. Jornada de actualización técnica para profesionales "Fertilización de Soja". *Informaciones agronómicas del Cono Sur*, I, 3: 9-10 pp.
-  De Boer, D.L. and S.H. Duke. 1982. Effects of Sulphur nutrition on Nitrogen and Carbon metabolism in Lucerne (*Medicago sativa* L.). *Physiology Plant.*, 54: 343-350.
-  Dietz, K.J. 1989. Recovery of Spinach leaves from sulfate and phosphate deficiency. *J. Plant Physiology*, 134: 551-557.
-  Duke, S. and H. Reisenauer. 1986. Roles and requirements of Sulfur in plant nutrition. pp 123-168. In: M.A. Tabatabai (ed.), *Sulphur in agriculture*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, USA.
-  Echeverría, H. y F. García. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de Trigo, Maíz, Girasol y Soja. *Boletín Técnico N° 149*. INTA EEA Balcarce, 16 p.
-  Echeverría, H. E. 2000. Monitoreo de la fertilidad en el sistema suelo-planta. pp 29-30. En: *Jornada de actualización técnica para profesionales "Fertilidad 2000"*, INPOFOS, Rosario.
-  Edelbauer, A. 1980. Auswirkung von abgestuftem schwefelmangel auf wachstum, substanzbildung und mineralstoffgehalt von Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in Nährlösungskultur. *Die Bodenkultur*, 31: 229-241.
-  Ericksen, J. 1997 (a). Sulphur cycling in Danish agricultural soils: Turnover in organic S fractions. *Soil Biology and Biochemistry*, 29, 9/10: 1371-1377.







-
-  Ericksen, J. 1997 (b). Sulphur cycling in Danish agricultural soils: Inorganic sulphate dynamics and plant uptake. *Soil Biology and Biochemistry*, 29, 9/10: 1379-1385.
-  Ericksen, J., M. D. Murphy and E. Schnug. 1998. The soil Sulphur cycle. pp 39-73. In: Ewald Schung (ed.). *Sulphur in agroecosystems*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/Boston/London.
-  Fehr, W.R. and C.E. Caviness. 1977. Stages of Soybean development. Iowa St. Univ. Special Report 80, 11 p.
-  Ferrari, M., J. Ostojic y G. Ferraris. 1999 (a). Evaluación de dosis, fuentes y localización de Nitrógeno en siembra directa de Maíz. Ensayos de la campaña 1998/1999. Informe de resultados. (Informe preparado para la empresa Hydro Agri). INTA EEA Pergamino, 32 p.
-  Ferrari, M., J. Ostojic, G. Ferraris, F. Rimatori y M.L. Rivero de Galetto. 1999 (b). Evaluación de tres métodos de diagnóstico de deficiencias de Nitrógeno en Maíz. *Revista de Tecnología Agropecuaria*, IV, 12: 8-12.
-  Ferrari, M., J. Ostojic, L. Ventimiglia, H. Carta, G. Ferraris, S. Rillo, M.L. Rivero de Galetto, F. Rimatori y M. V. Bernasconi. 2000. Predicción de la respuesta del Maíz a la fertilización nitrogenada mediante indicadores de suelo y planta en el estado de seis hojas. En: *Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (CD Rom)*, Mar del Plata, Buenos Aires.
-  Ferraris, G., M. Ferrari y J. Ostojic. 2000. Momentos de aplicación de fertilizantes azufrados en Soja de Primera. Campaña 1999/2000. Informe de

- resultados.(Informe preparado para la empresa PASA S.A.). INTA EEA Pergamino, 15 p.
-  Ferraris, G.N. 2001. Nutrición: La cosecha que se lleva el carretón del lote. Revista Fertilizar, VI, 24: 28-29.
-  Ferraris, G., M. Ferrari y J. Ostojic. 2001 *a*. Experiencias de fertilización azufrada en Soja y Trigo/Soja en Pergamino. Revista de Tecnología Agropecuaria, VI, 18:16-19.
-  Ferraris, G., M. Ferrari y J. Ostojic. 2001 *b*. Fertilización fosforada en Soja: fitotoxicidad en aplicaciones localizadas a la siembra y efectos sobre el rendimiento. Revista de Tecnología Agropecuaria, VI, 18:20-23.
-  Ferraris, G., F. Gutiérrez Boem y H. Echeverría. 2002. Soja: respuesta a la fertilización en el área sojera argentina. Resultados campañas 2000-01 y 2001-02 de la red de ensayos del proyecto Fertilizar-INTA, 15 p.
-  Flannery, R. 1989. The use of maximum yield research technology in Soybean production. pp 160-174. In: R. Munson (ed). The physiology, biochemistry, nutrition and bioengineering of Soybean: Implications for future management. PPI/PPIC.
-  Fontanive, A.V., A. M. de la Horra and M. Moretti. 1996. Foliar analysis of Sulphur in diferents Soybean cultivar stages and its relation to yield. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 27, 1&2: 179-186.
-  Freney, J.R., K. Spencer and M.B. Jones. 1978. The diagnosis of Sulphur deficiency in Wheat. Aust. J. Agric. Res., 29: 727-738.







-
-  Galantini, J., M. Landriscini y R. Fernández. 2002. Azufre en suelos del sur bonaerense: disponibilidad y su relación con las fracciones orgánicas. pp 1-5. En: Jornada nacional sobre “Azufre, diagnóstico y fertilización”. AACCS-INPOFOS- TSI- Fertilizar, La Plata.
-  Galarza, C., V. Gudelj, P. Vallone y B. Masiero. 2000. Fertilización y monitoreo de nutrientes en Soja. pp 28-30. En: Soja: Resultados de ensayos de la campaña 1999/2000. Información para extensión N° 63. INTA EEA Marcos Juárez.
-  García, F. 2000. Requerimientos nutricionales de los cultivos. pp 40-43. En: Jornada de actualización técnica para profesionales "Fertilidad 2000", INPOFOS, Rosario.
-  Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle-size análisis. pp 383-411. In: Klute, A. (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. Agronomy monograph N° 9. (2nd Edition). ASA-CSSA-SSSA, Madison, USA.
-  Gerster, G. y F. Salvagiotti. 2002. Secuencia Trigo-Soja: Respuesta a la fertilización en la región pampeana. Informe de resultados de la red de ensayos del Proyecto Fertilizar, campaña 2001-02. 19 p.
-  Ghani, A. 1994. An overview of organic Sulphur levels in New Zealand pastoral soils and methods for measuring the mineralizable pool of organic Sulphur. Sulphur in Agriculture, 18: 13-18.

-
-  Giorda, L. 1997. La Soja en la Argentina. pp. 11-26. En: Giorda, L. y H. Baigorri. (eds.). El cultivo de Soja en Argentina. INTA Centro Regional Córdoba-Editar.
-  Golbitz, P. 1993. Aspectos prácticos de la comercialización de productos de Soja y otros alimentos de Soja listos para su consumo. Soya Noticias, 227: 6-13.
-  González, N. 2000. Inoculación e inoculantes. Revista Fertilizar, V, 21: 18-21.
-  Greenwood, D., G. Lemaire, G. Gosee, P. Cruz, A. Draycott and J. Neeteson. 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. Annals of Botany, 66: 425-436.
-  Grill, E., E.L. Winnacker and M.H. Zenk. 1987. Phytochelatins, a class of heavy metal binding peptides from plants are functionally analogous to metellothioneins. Proc. Natl. Acad. Sci. (USA), 84: 439-443.
-  Gutiérrez Boem, F. H., J. D. Scheiner and R. S. Lavado. 1999. Identifying fertilization needs for Soybean in Argentina. Better Crops International, 13, 2: 6-7.
-  Gutiérrez Boem, F. H. y J. D. Scheiner. 1999. Soja: Ajustes en la fertilización. Revista Supercampo. Año VI, N°62: 36-39.
-  Gutiérrez Boem, F. H., J. D. Scheiner, N. Capurro y R. S. Lavado. 2000. Fertilización azufrada en Soja en el centro-norte de la provincia de Buenos

Aires. En: Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (CD Rom), Mar del Plata, Buenos Aires.








-  Haneklaus, S., E. Evans and E. Schnug. 1992. Baking quality and Sulphur content of Wheat. I. Influence of grain Sulphur and protein concentrations on loaf volume. *Sulphur in Agriculture*, 16: 31-34.
-  Haneklaus, S. and E. Schnug. 1992. Baking quality and Sulphur content of Wheat. II. Evaluation of the relative importance of genetics and environment including Sulphur fertilization. *Sulphur in Agriculture*, 16: 35-39.
-  Hoeft, R.G. and R.H. Fox. 1986. Plant response to Sulfur in the Midwest and Northeastern United States. pp. 345-356. In: M.A. Tabatabai (ed.), *Sulphur in agriculture*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, USA.
-  Hymowitz, T. and R. Singh. 1987. Taxonomy and speciation. pp 23–48. In: J.R. Wilcox (ed.), *Soybean: Improvement, production and uses*, 2nd ed. ASA, Madison, USA.
-  Hymowitz, T. 1985. Anti-nutritional factors in Soybean: Genetics and breeding. pp 368-373. In: R. Shibles (ed.), *Proceedings of the World Soybean Research Conference III*. Ames, Iowa. EEUU.
-  Johnson, G.V. 1987. Sulfate: Sampling, testing and calibration. pp 89-96. In: J.R. Brown (ed.), *Soil testing: Sampling, correlation, calibration, and interpretation*, SSSA, Madison, USA.

- ☞ Johnson, G.V. and P.E. Fixen. 1990. Testing for Sulfur, Boron, Molybdenum and Chlorine. pp 265-273. In: R. Shibles (ed.). Proceedings of the World Soybean Research Conference III. Ames, Iowa. EEUU.
- ☞ Jones, M.B. 1986. Sulfur availability indexes. pp. 549-566. In: M.A. Tabatabai (ed.), Sulphur in agriculture. ASA-CSSA-SSSA, Madison, USA.
- ☞ Karmoker, J.L., D.L. Clarkson, L.R. Saker, J.M. Rooney and J.V. Purves. 1991. Sulphate deprivation depresses the transport of Nitrogen to the xylem and the hydraulic conductivity of Barley (*Hordeum vulgare* L.) roots. *Planta*, 185: 269-278.
- ☞ Kjeldahl, J. 1883. Neue methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Korpern. *Z.Anal.Chem.*22: 366 – 382.
- ☞ Krupa, S.V. y M.A. Tabatabai. 1986. Measurement of Sulfur in the atmosphere and in natural waters. pp. 491-548. En: M.A. Tabatabai (ed.). Sulphur in agriculture. ASA-CSSA-SSSA, Madison, USA.
- ☞ Lachica Garrido, M. 1964. Determination of Sulphur in plant material. *Analyst*, 89: 61-66.
- ☞ Lavado, R.S., C. Porcelli, y R. Alvarez. 2001. Nutrient and heavy metal concentration and distribution in Corn, Soybean and Wheat as affected by different tillage systems in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research*, 62: 55-60.

-
-  Lisle, L., R. Lefroy, G. Anderson and G. Blair. 1994. Methods for the measurement of sulphur in plants and soil. *Sulphur in Agriculture*, Vol 18:45-54.
-  Marschner, H.E. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. Second edition. Academic Press, London/San Diego/New York/Boston/Sydney/Tokyo, 889 p.
-  Martínez, F. y G. Cordone. 1998. Resultados de ensayos de fertilización azufrada en Soja. pp 53-60. En: *Para mejorar la producción en Soja*, N°8 Campaña 1997/98. INTA EEA Oliveros.
-  Martínez, F. y G. Cordone. 1999. Respuestas del Maíz a la fertilización azufrada en franjas exploratorias. Evaluación de la producción física y de la viabilidad económica. pp 108-111. En: *Seminario sobre diagnóstico de deficiencias de Nitrógeno, Fósforo y Azufre en cultivos de la región Pampeana*. INTA EEA Balcarce.
-  Martínez, F., G. Cordone y R. Abrate. 1999. Fertilizar el Trigo con Azufre y ganar con el rendimiento de la Soja de segunda. pp 105-107. En: *Seminario sobre diagnóstico de deficiencias de Nitrógeno, Fósforo y Azufre en cultivos de la región Pampeana*. INTA EEA Balcarce.
-  Martínez, F. y G. Cordone. 2000. Avances en el manejo del Azufre. Novedades en respuesta y diagnóstico en Trigo, Soja y Maíz. pp 28-30. En: *Jornada de actualización técnica para profesionales "Fertilidad 2000"*. INPOFOS, Rosario.

-
- ☞ Maynard, D.G., J.W. Stewart and J.R. Bettany. 1983. Sulfur and Nitrogen mineralization in soils compared using two incubation techniques. *Soil Biology and Biochemistry*, 15(3): 251-256.
- ☞ McLaren, R.G. and R.S. Swift. 1977. Changes in soil organic Sulphur fractions due to the long-term cultivation of soils. *J. Soil Sci.*, 28: 445-453.
- ☞ Melgar, R. y M. Gearhart. 2000. Azufre, la diversidad. *Revista Fertilizar, especial Siembra Directa*, pp 24-34.
- ☞ Mengel, K. y E. Kirby. 2000. *Principios de nutrición vegetal*, 4ta. edición, 1ra. en español. Instituto Internacional de la Potasa, Basilea, Suiza, 607 p.
- ☞ Merrien, A. 1992. *Physiologie du tournesol*. CETIOM, Paris, 66 p.
- ☞ Messick, D.L. 1992. Soil test interpretation for Sulphur in the United States, an overview. *Sulphur in Agriculture*, 16: 24-25.
- ☞ Nuttall, W.F. 1985. Effect of N, P, and S on Alfalfa grown on three soil types in north-eastern Saskatchewan. II. Nitrogen, P and S uptake and concentration in herbage. *Agron. J.*, 77: 224-228.
- ☞ O'Hara, G.W., M. Franklin and M.J. Dilworth. 1987. Effect of Sulphur supply on sulfate uptake, and alkaline sulfatase activity in free-living and symbiotic bradyrhizobia. *Arch. Microbiology*, 149: 163-167.
- ☞ Pascale, A. 1969. Tipos agroclimáticos para el cultivo de Soja en Argentina. *Revista Facultad de Agronomía y Veterinaria UBA*, 17, 3: 31-48.
- ☞ Pascale, A. 1989. Evolución del cultivo de la Soja en Argentina. *Revista de la Asociación Argentina de la Soja*, Vol IX, 1-2: 9-17.

- ☞ Porzio, L. 1970. Soja. Posibilidades de aumentar su utilización industrial. *Revista Bolsa de Cereales*, 2833: 32-36.
- ☞ Prietzel, J. and C. Hirsch. 2000. Ammonium fluoride extraction for determining inorganic Sulphur in acid forest soils. *European Journal of Soil Science*, 51: 323-333.
- ☞ Rauser, W.E. 1990. Phytochelatin. *Annual Review Biochemistry*, 59: 61-86.
- ☞ Rubio, G.; Lavado, R.S.; Taboada, M.A.; Scheiner, J.D.; M.M. Zubillaga y Vrdoljak G. 1996. Ventajas de la fertilización combinada en colza-canola. *Oleaginosos*. 14: 16-19.
- ☞ Sainz Rozas H. y H. Echeverría. 1999. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta Spad 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de Maíz y el rendimiento de grano. pp 108-111. En: Seminario sobre diagnóstico de deficiencias de Nitrógeno, Fósforo y Azufre en cultivos de la región Pampeana. INTA EEA Balcarce.
- ☞ San Martín, N., C. Navarro y H. Echeverría. 1988. Determinación de Azufre en material vegetal. *IDIA*, 457-462: 40-45.
- ☞ Scheiner, J.D., F.H. Gutiérrez Boem y R.S. Lavado. 1999 a. Experiencias de fertilización de Soja en el centro norte de Buenos Aires. pp 22-24. En: Jornada de actualización técnica para profesionales "Fertilización de Soja", INPOFOS, Rosario.
- ☞ Scheiner, J.D., Gutiérrez Boem, F.H. y Lavado. 2000. Dinámica de la absorción y partición de nutrientes en Soja. *Phyton* 69: 77-84.

-
-  Schiff, J.A. 1983. Reduction and other metabolic reactions of sulfate. In: A. Läuchli and R.L. Bielecki (eds), *Encyclopedia of Plant Physiology, New Series*. 15: 401-421. Springer-Verlag, Berlín and New York.
-  Schmidt, A. and K. Jäger. 1992. Open questions about Sulfur metabolism in plants. *Annual Review Plant Physiology. Plant Molecular Biology*, 43: 325-349.
-  Schnug, E. 1990. Sulphur nutrition and quality of vegetables. *Sulphur in Agriculture*, 14: 3-7.
-  Schnug, E. 1991. Sulphur nutritional status of european crops and consequences for agriculture. *Sulphur in Agriculture*, 15: 7-12.
-  Schnug, E. 1993. Physiological functions and enviromental relevance of Sulphur-containing secondary metabolites. pp. 179-190. In: L.J. de Kok, I. Stulen, H. Rennenberg, C. Brunold and W.E. Rauser (eds.), *Sulphur nutrition and assimilation in higher plants*. SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands.
-  Schnug E. and S. Haneklaus. 1998. Diagnosis of Sulphur nutrition. pp 1-40. In: Ewald Schung (ed.), *Sulphur in Agroecosystems*. Kluwer Acaemic Publishers. Dordrecht/Boston/London.
-  Schütz, B., L.J. de Kok and H. Rennenberg. 1991. Thiol accumulation and cysteine desulfurylase activity in H₂S-fumigated leaves and leaf homogenaes of cucurbit plants. *Plant Cell Physiology*, 32: 733-736.

- ☞ Sfredo, G.J.; A.F. Lantamann; R.J. Campo y C.M. Borkert. 1986. Soja, nutrição mineral, adubação e calagem. EMBRAPA-CNOSo, Londrina, 51p.
- ☞ Sillem, Carlos Roberto. 1998: Azufre en suelos: Uso de diferentes extractantes y su relación con la absorción por parte de los vegetales. Trabajo de intensificación para optar al título de Ing. Agr. FAUBA. 33 pp más anexos.
- ☞ Sosa, L.J, H.E. Echeverría, G.A. Dosio y L.A. Aguirizábal. Evaluación de la nutrición nitrogenada de Girasol cultivado en Balcarce (Buenos Aires, Argentina). *Ciencia del suelo*. 17 (1): 20-26.
- ☞ Spencer, K. y J.R. Freney. 1980. Assessing the sulphur status of field-grown Wheat by plant analysis. *Agronomy Journal*, 72: 469-472.
- ☞ Stanford, G. and H.V. Jordan. 1966. Sulfur requirements of sugar, fiber and oil crops. *Soil Sci*, 101:258-266.
- ☞ Sunarpi and J.W. Anderson. 1997. Allocation of S in generative growth of Soybean. *Plant Physiology*, 114: 687-693.
- ☞ Tabatabai, M.A. and A.A. Al-Khafaji. 1980. Comparison of Nitrogen and Sulfur mineralization in soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44:1000-1006.
- ☞ Tabatabai, M.A. and J.M. Bremner. 1972. Distribution of total and available Sulfur in selected soils and soil profiles. *Agronomy Journal*, 64:40-44.
- ☞ Till, R. and G. Blair. 2002. Management of sulfur. Fertility and fertilization. Simposio de fertilidad de suelos y fertilización en siembra directa. X Congreso nacional de AAPRESID, pp 169-189.

-
- ☞ Thompson, J.F., I. Smith and J. Madison. 1986. Sulphur metabolism in plants. pp. 57-121. En: M.A. Tabatabai (ed.), Sulphur in Agriculture. ASA-CSSA-SSSA, Madison, USA.
- ☞ Tisdale, S., W. Nelson, J. Beaton y J. Havlin. 1993. Soil Fertility and Fertilizers, fifth edition. Macmillan, New York, 634 p.
- ☞ Walkley, A. and A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37: 29 - 38.
- ☞ Watkinson, J.H. and M.J. Kear. 1996. Sulfate and mineralizable organic Sulfur in pastoral soils of New Zealand. A soil test for mineralizable organic Sulfur. Australian J. Soil Res., 34: 385-403.
- ☞ Yamada T. 1999. Adubação balanceada da Soja. pp 12-17. En: Jornada de Actualización técnica para Profesionales "Fertilización de Soja", INPOFOS, Rosario.
- ☞ Zhao, F. and S.P. Mc Grath. 1994. Extractable sulphate and organic Sulphur in soils and their availability to plants. Plant and Soil, 164: 243-250.

ANEXO

DESCRIPCIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS QUÍMICOS DE S
REALIZADOS EN SUELO Y PLANTA

Extracción de S en suelo con acetato de amonio

Reactivos y soluciones:

Solución extractiva: Pesar 39 g de acetato de amonio y disolver en 1 litro de ácido acético 0,25 N.

Carbón activado

Procedimiento:

Pesar 10 g de muestra de suelo seco y tamizado por 2mm. Agregar 25 ml de la solución extractiva. Agitar durante 30 minutos. Filtrar. Agregar carbón activado. Filtrar. Realizar turbidimetría.

Extracción de S en suelo con fosfato diácido de potasio:

Reactivos y soluciones:

Solución Extractiva: Pesar 2,197 g de Fosfato diácido de Potasio(KH₂PO₄), en 1000 ml de agua destilada.

Procedimiento:

Pesar 10 gr de muestra, en tubos de centrifuga. Agregar carbón activado libre de sulfatos. Agregar 25 ml. de Solución Extractiva. Agitar por 30 minutos. Centrifugar. Filtrar con papel de filtro libre de sulfatos, Whatman 42, Toyo 5b. El líquido sobrenadante debe ser incoloro.

Extracción de S en tejido vegetal con ácido nítrico y perclórico:**Reactivos y soluciones:**

Acido nítrico (HNO₃)

Acido perclórico (HClO₄)

Procedimiento:

Pesar 250 mg de material de planta secado y molido en un tubo de digestión. Agregar 5 ml de ácido nítrico (70 %) y ácido perclórico (70 %) en una relación 2:1. Agregar el ácido inclinando el tubo para asegurar un íntimo contacto ácido-material vegetal. Realizar una predigestión dejando reposar el ácido sobre el material vegetal una noche a temperatura ambiente. Calentar a 150 °C durante una hora para evaporar los humos de oxido de dinitrógeno. Incrementar la temperatura a 200 °C durante dos horas, para provocar la oxidación completa del material. Enfriar a temperatura ambiente. Agregar 1 ml de cloruro de hidrógeno para liberar el ácido nítrico presente. Calentar a 200 °C durante 30 minutos más. Dejar enfriar, y lavar las paredes de los tubos con 30 ml de agua destilada. Calentar los tubos sobre el digestor por 10 minutos a 60-70 °C. Llevar a un volumen de 75 ml, cerrar los tubos y mezclar invirtiendo el tubo varias veces.

Lectura del extracto por turbidimetría. (para todos los métodos de extracción)

Reactivos y soluciones :

Solución de dicloruro de bario al 10 %

Solución ácida "Seed": Pesar 0,054 g de sulfato de potasio y disolver en ácido clorhídrico 6 N en un matraz de 500 ml. Llevar a volumen con el mismo solvente y guardar en envase plástico

Procedimiento:

En tubos de ensayo colocar en el siguiente orden: 1) 10 ml de extracción, 2) 1 ml de solución "Seed", 3) 1 ml de dicloruro de bario. Dejar reposar 5 minutos. Leer en Espectrofotómetro en 420 nm.