

valor estimado de S-sulfato de 0-60 cm fue de 7.13 ± 0.26 mg kg^{-1} . Siguiendo el mismo razonamiento, para igual concentración de S-sulfato pero de 0-40 cm, el valor estimado de 0-60 cm es de 8.26 ± 0.14 mg kg^{-1} . Considerando que Alvarez et al. (2001) reportaron una sobrestimación de solo el 2% en la concentración de N-mineral en el estrato de 0-60 cm, por asumir igual densidad entre estratos de suelos, es factible para nuestras condiciones emplear una densidad promedio de 1.2 Mg m^{-3} para el perfil del suelo (Fabrizzi et al., 2005). Esto permite estimar la disponibilidad de S ($\text{kg S-sulfato ha}^{-1}$) en los primeros 60 cm del suelo, la cual para el ejemplo planteado sería de 51.3 y de 59.4 $\text{kg S-sulfato ha}^{-1}$ cuando se utiliza como variable predictiva el estrato de 0-20 y 0-40 cm, respectivamente. Esta información es relevante para efectuar el diagnóstico de la deficiencia de S para los cultivos. Por último, en la Figura 3 se presenta a modo de ejemplo y para el cultivo de trigo, un esquema resumido de los pasos a seguir desde el momento que se realiza el muestreo de suelo hasta la determinación del diagnóstico de la deficiencia de S (muestreo, determinación de S-sulfato, elección del modelo de predicción y diagnóstico).

Conclusion

Los resultados obtenidos en esta experiencia indican que es factible estimar la concentración de S-sulfato en los primeros 60 cm del suelo. Si bien el muestreo en superficie (0-20 cm) presenta ventajas desde el punto de vista práctico, es recomendable el muestreo del estrato de 0-40 cm para situaciones en las cuales se busca una mayor precisión. Por último, es válido mencionar que esta información debe ser validada previó a su utilización en regiones con suelos de texturas más gruesas y con menores contenidos de materia orgánica que los considerados en esta experiencia.

Agradecimiento:

Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto INTA AERN5656 y de la UNMP AGR261/2008.

Bibliografía

Alvarez C.R., R. Alvarez y H.S. Steinbach. 2001. Predictions of available nitrogen content in soil profile depth using available nitrogen concentration in surface layer. *Communication in Soil Science and Plant Analysis* 32: 759-769.
 Blake Kalff M.M.A., F.J. Zhao y S.P. McGrath. 2002. Sulfur deficiency diagnosis using plant tissue analysis. In: *Proceedings 503. International Fertilizer Society*. York, UK. pp. 1-23.
 Bloem E., S. Haneklaus, G. Sparovek y E. Schnug. 2001. Spatial and temporal variability of sulphate concentration in soils. *Communi-*

ication in Soil Science and Plant Analysis 32: 1391-1403.

Dominguez G.F., G.A. Studdert, H.E. Echeverría y F.H. Andrade. 2001. Sistemas de cultivo y nutrición nitrogenada en maíz. *Ciencia del Suelo* 19: 47-56.

Fabrizzi K.P., F.O. García, J.L. Costa y L.I. Picone. 2005. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research* 81: 57-69.

González Montaner J.H., G.A. Maddoni y M.R. Dinapoli. 1997. Modeling Grain Yield and Grain Yield Response to Nitrogen in Spring Wheat Crops in the Argentinean Southern Pampa. *Field Crops Research* 51: 241-252.

Islam M. y N. Bhuiyan. 1998. Evaluation of various extractants for available sulfur in wetland rice (*Oryza sativa*) soils of Bangladesh. *Indian Journal Agricultural Science* 58: 603-606.

Jones M.B. 1986. Sulfur availability indexes. In *Sulfur in Agriculture*, Vol 27. Tabatabai, M.A. ed. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA. pp. 549-566.

Johnson G.V. 1987. Sulfate: Sampling testing, and calibration. P. 89-96. In J. R. Brown (ed.). *Soil testing: Sampling correlation, calibration and interpretation*. SSSA Spec. Publ. 21. SSSA, Madison, WI.

Prystupa P., F. Gutierrez Boem, F. Salvaggiotti, G. Ferraris y L. Couretot. 2006. Measuring corn response to fertilization in the Northern Pampas. *Better Crops* 90: 25-27.

Reussi Calvo N., H.E. Echeverría y H.R. Sainz Rozas. 2006a. Comparación de métodos de diagnóstico de deficiencias de azufre en trigo. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas y CD 2 pág. Salta- Jujuy, Argentina.

Reussi Calvo N., H.E. Echeverría y H.R. Sainz Rozas. 2006b. Respuesta del cultivo de trigo al agregado de azufre en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 24: 77-87.

Reussi Calvo N., H.E. Echeverría y H.R. Sainz Rozas. 2008. Determination of sulfate concentration in soil: depth of sampling. *Communication in Soil Science and Plant Analysis* (En prensa).

San Martín N.F. y H.E. Echeverría. 1995. Sulfato en suelos del sudeste Bonaerense. *Ciencia del Suelo*. 13: 95-97.

Salazar Lea Plaza J.C. y G. Moscatelli. 1989. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. Editorial Edipubli S.A, Buenos Aires, Argentina. pág. 525.

Salvaggiotti F. y D.J. Miralles. 2007. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. *European Journal of Agronomy*.

Sas Institute Inc. 1988. SAS/STAT Users Guide. Version 6.03 Edition. Cary, NC.

Scherer H.W. 2001. Sulfur in crop production. *European Journal of Agronomy* 14:81-111.

Walkley A. y I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-37.

Zhao F.J. y S.P. McGrath. 1994. Soil extractable sulphate and organic sulphur and their availability to plants. *Plant and Soil* 164: 243-250. <

FERTILIZACIÓN FOSFATADA DEL CULTIVO DE SOJA EN SUELOS DE LA REGIÓN CENTRAL DE SANTA FE:

RESPUESTA FÍSICA DEL CULTIVO, EFICIENCIA DE USO DEL P Y NIVELES CRÍTICOS EN EL SUELO

Fontanetto, H.¹, O. Keller¹, D. Giailevra², L. Belotti² y C. Negro²

¹INTA, EEA Rafaela, Ruta 34 km 227, (2300) Rafaela, Santa Fe. ²Actividad Privada, (2300) Rafaela, Santa Fe. hfontanetto@rafaela.inta.gov.ar

Presentado en el XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, AACs. San Luis, Mayo 2008.

Introducción

La soja es un cultivo en franca expansión en la Argentina y en todas sus regiones productivas durante la última década, siendo cultivada en zonas y en suelos muy variados; factores que junto a los altos precios internacionales, a la gran expansión de la siembra directa y la simplicidad del manejo de los materiales tolerantes a glifosato, determinaron ese notable crecimiento.

Lo mencionado precedentemente permitió que la producción nacional de soja llegue a 47 millones de toneladas, pero estos altos valores productivos conllevan también a una alta extracción de nutrientes del suelo. Es conocido

que la soja es el cultivo que más altos índices de cosecha tiene entre los cultivos agrícolas y particularmente de fósforo (P) (Arias et al., 1989; Berardo, 2000; Diaz Zorita et al., 2000; Echeverría y García, 1998; Fontanetto y Keller, 2006a; Gutiérrez Boem et al., 1998), lo que produjo las alarmantes disminuciones de los niveles de P extractable del suelo que se registró en todo el país (Darwich, 1980; Arias et al., 1989; Tasi, 2000; Quinteros et al., 2000; Fontanetto y Keller, 2005).

Para la zona central de Santa Fe se mencionan tasas de disminución de P disponible del suelo (Bray I) de 1,2 a 1,6 ppm/año (Fontanetto

y Keller, 2006b), lo que provocó que toda la zona centro-oriental presente una deficiencia generalizada de este nutriente, con valores que no superan los 10 ppm en la capa 0-20 cm del suelo.

Ante este panorama, resulta necesario desarrollar prácticas tecnológicas localmente adaptadas para el manejo de P que faciliten y promuevan un mayor y más eficiente uso de los fertilizantes fosfatados a fines de contribuir a la sustentabilidad de los sistemas de producción agrícola. En este sentido, el mantenimiento de la fertilidad de los suelos o la reposición de los nutrientes extraídos por las cosechas es uno de los requisitos más importantes.

Por lo mencionado, es muy importante contar con información actualizada de la respuesta de la soja a la fertilización fosfatada, dada la continua aparición en el mercado de materiales con potenciales de producción cada vez más altos. La soja se caracteriza por presentar niveles críticos de P en suelo (debajo de los cuales se observan respuestas significativas a la fertilización) menores a los de otros cultivos tales como alfalfa, trigo y maíz. Por lo tanto, el diagnóstico de la fertilización fosfatada se basa en el análisis de muestras de suelo del horizonte superficial utilizando un extractante adaptado a los suelos del área en evaluación, siendo para la región pampeana de Argentina en general, el extractante Bray 1. El análisis de la capa superficial del suelo (0-20 cm) representa la información más precisa para identificar la deficiencia de P y la causa de bajas producciones y eventualmente decidir la fertilización para eliminarla como limitante de la producción (Melgar *et al.*, 1995). A pesar de ello, la respuesta a la fertilización fosfatada en el cultivo de soja resulta a veces errática (Gutiérrez Boem *et al.*, 1998).

Los objetivos de este trabajo fueron evaluar el efecto de la fertilización fosfatada sobre el rendimiento del cultivo de soja y determinar los niveles críticos de P extractable en suelos de la zona central de la provincia de Santa Fe.

Materiales y Métodos

Durante las campañas 2002/03, 2003/04, 2004/05, 2005/06 y 2006/07 se implantaron 32 ensayos en lotes de producción del área central de Santa Fe, ubicados en los departamentos Las Colonias, San Justo y San Jerónimo, sobre suelos argiudoles y en lotes con siembra directa continua. El detalle de los mismos aparece en la Tabla 1.

Se evaluaron cinco tratamientos: testigo (P0), 10 (P10), 20 (P20) 30 (P30) y 40 (P40) kg de P ha⁻¹, aplicados como superfosfato triple de calcio (20% de P) al momento de la siembra, al costado y por debajo de la línea de siembra. El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar, con cuatro repeticiones y en parcelas de 6 surcos de ancho por 7 m de largo. El rendimiento de granos fue evaluado mediante cosecha manual (sobre 10 m² en cada parcela y expresados al 13,5% de humedad). Se calculó el Rendimiento Relativo (RR: rendimiento del testigo/rendimiento "máximo"). El rendimiento "máximo" de cada experimento fue estimado a través del promedio de los rendimientos de los tratamientos con más alta producción en cada repetición. La determinación del nivel crítico de P en suelo fue realizada por medio del método gráfico de Cate y Nelson (1965). Los resultados se analizaron estadísticamente mediante procedimientos incluidos en las rutinas del programa SAS (SAS, 1999).

Resultados y Discusión

El 81% de los suelos de este estudio presentaron valores de P extractable inferiores a 17 ppm, lo que demuestra la generalizada deficiencia de este nutriente, y debido al balance negativo de los sistemas agrícolas de la región (extracción por los cultivos respecto a la aplicación como fertilizantes). El rendimiento medio de todos los sitios y tratamientos fue de 3.570 kg/ha, con rangos de 2.274 a 5.318 kg/ha. Se observó un efecto significativo ($p < 0.05$) de la fertilización

con P sobre el rendimiento de granos del cultivo de soja para el análisis conjunto de los sitios evaluados, con diferencias entre el testigo y los tratamientos fertilizados; y entre P10 respecto a P20, P30 y P40. No se presentaron diferencias para los niveles P20, P30 y P40 (Fig. 1). Las respuestas medias de los tratamientos en kg/ha fueron de 233 (P10), 446 (P20), 499 (P30) y 479 (P40).

Las eficiencias de uso del P fueron de 23,3; 22,3; 16,6 y 12,0 kg de grano/kg de P aplicado para las dosis de P10, P20, P30 y P40, respectivamente. La respuesta del cultivo de soja al agregado del P se detalla en la Figura 2, agrupándose los rendimientos en cuatro rangos de P extractable del suelo (0-20 cm).

La soja presentó respuesta a la fertilización fosfatada hasta valores de 17 ppm de P extractable Bray I, por encima de esos niveles la respuesta fue nula. Estos resultados difieren de los obtenidos por otros autores (Melgar *et al.*, 1995; Barbagelata *et al.*, 2002; Ferrari *et al.*, 2005) quienes habían encontrado niveles críticos entre 9 a 13 ppm. Los más altos incrementos al agregado de P se dieron en el rango de P Bray 5,0 a 9,9 ppm (aumentos de 346 a 671 kg/ha), luego en el rango de 10,0 a 13,9 ppm (incrementos de 240 a 537 kg/ha) y finalmente para el rango de 14,0 a 16,9 ppm (aumentos de 173 a 489 kg/ha).

Al relacionar el nivel de P extractable del suelo y el rendimiento relativo máximo alcanzado para cada sitio, se obtuvo mediante análisis gráfico, un umbral aproximado de 17 ppm de P en suelo necesarios para alcanzar un rendimiento relativo igual o superior al 95% (Fig. 3), quedando 3 puntos (10% de error) fuera de los cuadrantes inferior izquierdo y/o superior derecho. Estos valores encontrados son superiores a otras investigaciones desarrolladas en suelos similares de las provincias de Buenos Aires, Entre Ríos y Santa Fe (Melgar *et al.*, 1995; Barbagelata *et al.*, 2002; Ferrari *et al.*, 2005) y podría deberse a que los mayores potenciales de las nuevas variedades demandarían mayores cantidades de P y los niveles mencionados en esas experiencias estarían desactualizados.

La información obtenida permitió corroborar la alta respuesta de la soja a la fertilización fosfatada y la generalizada deficiencia de este nutriente en los suelos de la región central de Santa Fe. Asimismo, se validó que el análisis del P extractable de la capa superficial del suelo (0-20 cm) es una herramienta de diagnóstico para una correcta fertilización fosfatada de la soja en suelos argiudoles de la región central de la provincia de Santa Fe, determinándose en forma preliminar un nivel crítico de aproximadamente 17 ppm de P extractable, a partir del cual la probabilidad de respuesta disminuye sensiblemente.

Conclusiones

- La respuesta al agregado de P fue muy alta en todas las campañas agrícolas y se presentaron respuestas hasta con dosis de 20 kg/ha de P.
- Las mayores respuestas al P se verificaron en suelos con menos de 9 ppm de P extractable.
- Los incrementos promedios debidos a la fertilización variaron de 173 a 671 kg/ha.
- Las eficiencias de uso del P fueron muy altas.
- Los niveles críticos obtenidos son superiores a los informados hasta el presente para otras regiones de la Argentina.
- La mayor potencialidad de rendimiento de los nuevos cultivares podrían ser la causa de los altos niveles críticos encontrados en esta experiencia.

Bibliografía

- Arias N., J.J. De Battista; M. Landi y A. Cabelluzzi. 1989. Relevamiento de estimadores de la fertilidad de Vertisoles, Alfisoles e Intergrados del centro-este de Entre Ríos. INTA EEA C. del Uruguay. Serie Prod. Veg. N° 39.
- Barbagelata P.; R. Melchiori y O. Paporotti. 2002. Phosphorus fertilization of soybeans in clay soils of Entre Ríos province. Better Crops

International, 16(1): 3-5.

Berardo A. 2000. Dinámica del fósforo en el sistema suelo-planta: eficiencia, residualidad y manejo de la fertilización. INPOFOS. Jornada de actualización técnica para profesionales. Pág. 4-10.

Cate R.B.J. y L.A. Nelson. 1965. A rapid method for correlation of soil test analyses with plant response data. North Carolina Agric. Exp. Stn., Int. Soil Testing Series Tech. Bull. n° 1.

Darwich N. 1980. Niveles de fósforo asimilable en los suelos pampeanos. Actas IX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos.

Diaz Zorita M., G. Grosso, M. Fernandez Caniggia y G. Duarte. 2000. Efectos de la ubicación de un fertilizante nitrógeno-fosfatado sobre la nodulación y la producción de soja en siembra directa en la región de la Pampa Arenosa, Argentina. Ciencia del Suelo 17(2):62-65.

Echeverría H. y F. García. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín Técnico No. 149. EEA INTA Balcarce.

Ferrari M., R. Melchiori y H. Fontanetto. 2005. Fertilización fosfórica en soja: El aporte de la fracción orgánica lábil del suelo. INPOFOS Cono Sur. Instituto de la Potasa y el Fósforo. Simposio: "FERTILIDAD 2005". Trabajo de Poster.

Fontanetto H. y O. Keller. 2005. Consideraciones sobre el manejo de la fertilización en soja. A.A.P.R.E.S.I.D. FERTILIDAD y FERTILIZACION en Siembra Directa: 58-79. Diciembre 2005.

Fontanetto H. y O. Keller. 2006a. Consideraciones sobre el manejo de la fertilización de la soja. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información Técnica de cultivos de verano. Campaña 2006. Publicación Miscelánea N° 106: 45-79.

Fontanetto H. y O. Keller. 2006b. Manejo de

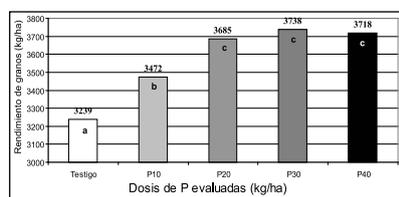


Figura 1. Rendimiento en granos de soja promedio según dosis de P. Letras distintas significan diferencias estadísticas, test LSD (P=0.05).

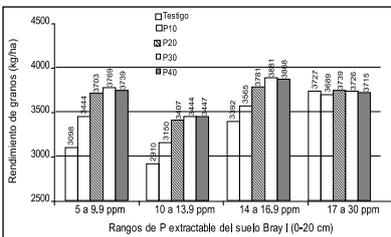


Figura 2. Respuesta de la soja a las dosis de P ensayadas y agrupadas por cuatro rangos de P extractable del suelo (0-20 cm).

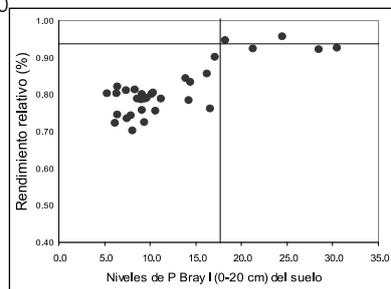


Figura 3. Relación entre el nivel de P extractable del suelo (Bray 1) y el rendimiento relativo de la soja en suelos de la región central de Santa Fe.

Tabla 1. Campañas agrícolas, sitios, cultivares empleados, distancias de plantación y nivel de P extractable promedio de cada sitio (0-20 cm) de las experiencias.

N°	Campaña	Sitios	Cultivar	Distancia	P Bray I (ppm)	MO (%)	pH	Antecesor
1	2002/03	S. M. Escobas	A 6445	0.52	17.1	2.78	5.9	maíz
2		Nelson	A 6601	0.52	5.3	2.20	5.8	sorgo
3		Humboldt	A 6445	0.52	18.2	2.93	6.0	maíz
4		S. J. Norte	A 6001	0.52	10.3	2.77	5.8	soja
5		M. Juana	TJ 2049	0.52	30.5	3.09	6.1	maíz
6		San Carlos	TJ 2049	0.52	8.6	2.42	5.9	soja
7	2003/04	Videla	ACA 505	0.52	6.4	2.33	5.8	soja
8		Larreacha	A 5409	0.52	9.1	2.54	5.9	soja
9		Videla	A 5901	0.52	8.3	2.47	5.9	soja
10		Bdo. De Irigoyen	A 6445	0.42	9.6	2.61	5.9	maíz
11		San Carlos	A 6445	0.52	16.2	2.67	5.9	maíz
12		Bdo. De Irigoyen	TJ 2049	0.52	14.4	2.44	5.9	maíz
13	2004/05	San Justo	TJ 2049	0.52	6.2	2.31	5.8	soja
14		Videla	A 6445	0.52	7.9	2.38	5.8	soja
15		Cnia. Silva	ACA 505	0.52	8.1	2.21	5.8	soja
16		Videla	A 6445	0.52	9.4	2.51	5.9	maíz
17		San Justo	A 6445	0.52	6.3	2.42	5.9	maíz
18		M. Juana	A 6411	0.52	21.3	3.12	5.9	maíz
19	2005/06	San Carlos	TJ 2049	0.52	10.2	2.68	5.9	maíz
20		Loma Alta	A 6445	0.52	10.6	2.59	5.9	soja
21		Arocena	A 6445	0.52	9.5	2.62	5.9	soja
22		San Carlos	TJ 2049	0.52	13.9	2.55	5.9	maíz
23		San Justo	DM 5800	0.52	7.5	2.16	5.9	maíz
24		M. Juana	A 6411	0.52	28.5	3.05	5.9	maíz
25	2006/07	Videla	A 6445	0.52	11.2	2.43	5.9	soja
26		Videla	ACA 505	0.52	6.4	2.22	5.9	soja
27		Nelson	DM 5800 I	0.52	9.1	2.08	5.9	maíz
28		M. Juana	ACA 605	0.52	24.5	2.93	5.9	soja
29		S. M. Escobas	A 6411	0.52	16.6	2.66	5.9	maíz
30		Humboldt	ACA 605	0.52	14.2	2.79	5.9	soja
31	2006/07	San Carlos	TJ 2055	0.52	9.0	2.41	5.9	maíz
32		San Justo	A 6411	0.52	7.4	2.37	5.9	soja