

FERTILIZACIÓN CON FÓSFORO Y AZUFRE EN ROTACIÓN DE CULTIVOS DEL CENTRO DE SANTA FE, ARGENTINA: BENEFICIOS PRODUCTIVOS Y ECONÓMICOS Y EVOLUCIÓN DEL P EXTRACTABLE

H.S. Vivas¹, N. Vera Candiotti¹, R. Albrecht¹, L. Martins¹ y J.L. Hotián²

Introducción

En el centro de la provincia de Santa Fe, Argentina, el doble cultivo trigo/soja es parte relevante de las rotaciones y por sí mismo constituye un sistema muy intensivo tanto en producción, como en extracción de nutrientes y es, a su vez, uno de los más dependientes de la disponibilidad hídrica. De allí la importancia de generar información involucrando varias campañas para caracterizar este sistema de producción. Por cuestiones técnicas y de riesgo, el sistema productivo deseable no es la simple secuencia trigo/soja, sino que más bien ésta debería formar parte de una secuencia de cultivos como trigo/soja-maíz-soja, para anexar los beneficios de la acumulación de agua y la fertilidad generada mediante una rotación.

Dada la amplia demanda de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) del trigo y la soja, podría aplicarse al trigo todos los requerimientos de ambos cultivos (García et al., 2001). El N, es fundamental para la gramínea, siguiéndole en importancia el P y el S (Vivas et al., 2010a), éstos últimos aportando efectos residuales y aditivos en la producción de granos (Vivas et al., 2006; Vivas et al., 2010b).

El P constituye un nutriente esencial y las condiciones de deficiencia en el suelo solo pueden remediarse mediante la aplicación de fertilizantes (Ozanne, 1962). Por su baja movilidad y con aplicaciones sucesivas, este elemento tiende a concentrarse en la superficie (Olsen et al., 1962). Esta estratificación favorece el desarrollo radicular en la superficie, pero ante un estrés temporal o prolongado de agua, su escasa movilidad le impide ser absorbido por la planta (Vivas et al., 2005; Vivas et al., 2009). Se considera que el nivel de P extractable (método Bray-Kurtz 1) en el suelo (0-20 cm), adecuado para la rotación trigo/soja, debe ubicarse por arriba de 15 ppm.

Albrecht et al. (2000), demostraron que el S es un nutriente relevante para los cultivos en el centro de Santa Fe. En suelos de la región pampeana se ha encontrado que más del 95 % del S total pertenece a formas orgánicas (Mizuno et al., 1990), el resto corresponde a compuestos inorgánicos como el $S-SO_4^{2-}$ en solución y el $S-SO_4^{2-}$ adsorbido, que constituyen las formas rápidamente tomadas por los cultivos (Havlin et al., 1999). Según Spencer y McLachlan (1975), citados por Havlin et al. (1999), las gramíneas requieren menos S que las leguminosas y crucíferas, diferencia que se refleja en las

concentraciones de S en el grano (Havlin et al., 1999). A diferencia del P, el $S-SO_4^{2-}$ tiene mayor movilidad en el suelo y puede ser absorbido por flujo masal y por difusión. Esta característica es importante para interpretar la respuesta de los cultivos a la fertilización con P y S en relación a las condiciones ambientales (disponibilidad hídrica). Las necesidades de fertilización con S en los sistemas de cultivos del centro de Santa Fe son muy recientes y se comparan con las demandas de P observadas en la zona hace alrededor de 30 años. La agricultura continua, sin aplicación de fertilizantes, produce una disminución del contenido de materia orgánica en el suelo y en consecuencia deprime el aporte de $S-SO_4^{2-}$ proveniente de la mineralización de la misma (Stevenson, 1986). Se considera que niveles superiores a 10 ppm de $S-SO_4^{2-}$ en el suelo (0-20 cm de profundidad) son adecuados para la rotación trigo/soja, aunque el diagnóstico de las deficiencias considerando este como el único parámetro no fue preciso en varios casos (Geniletti y Gutiérrez Boem, 2004; Reussi Calvo et al., 2006).

La fertilización del doble cultivo trigo/soja en una sola ocasión tiene importantes ventajas operativas al reducirse el número de aplicaciones y llegar al cultivo de soja de segunda sin otro compromiso que el de la siembra.

Los objetivos del presente estudio, conducido en el periodo 2000-2010, fueron evaluar los beneficios productivos y económicos de la fertilización con P y S sobre el doble cultivo trigo/soja como componente de una rotación trigo/soja-maíz-soja y determinar los efectos de esta fertilización en la evolución del P extractable del suelo como índice de fertilidad.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en la localidad de Bernardo de Irigoyen, departamento San Jerónimo, provincia de Santa Fe, Argentina, sobre un suelo serie Clason (Argiudol típico, arcilloso fino, illítico, térmico). Se aplicó una dosis uniforme de N al trigo (60 kg de N ha⁻¹), mientras que las dosis de P y S fueron variables y se aplicaron al cultivo de trigo con el propósito de fertilizar el doble cultivo por una sola vez. Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas en bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron una combinación de P en la macroparcela (0, 20 y 40 kg ha⁻¹) y de S en la subparcela (0, 12, 24 y 36 kg ha⁻¹). La fertilización de N-P-S se realizó siempre al momento de

¹ INTA EEA Rafaela, Ruta 34 Km 227 - CC 22 - (2300) Rafaela, Santa Fe, Argentina. Correo electrónico: hvivas@rafaela.inta.gov.ar

² Cooperativa Bernardo de Irigoyen, Juan XXIII No. 128, (2248) Bernardo de Irigoyen, Santa Fe, Argentina.

la siembra del trigo (2000-2003-2006 y 2009). El P se incorporó con la sembradora, pero el N y el S se distribuyeron al voleo. La unidad experimental fue de 4.2 x 12 m. El P se aplicó en forma de superfosfato triple (P = 20 %), el S como yeso (S = 18 %) y el N como urea (N = 46 %). Como se indicó, la soja de segunda no tuvo fertilización alguna.

Al inicio del experimento (2000), el contenido de materia orgánica del suelo (0-20 cm) fue de 2.9 %, el P extractable (Pe) de 11 ppm, el S-SO₄²⁻ de 9.5 ppm y el pH de 6.2. Luego de cada doble cultivo se tomaron muestras de suelo (0-20 cm) para analizar el Pe con el propósito de evaluar el efecto residual como índice de fertilidad. El rendimiento y los datos de contenido de Pe se analizaron estadísticamente utilizando SAS (SAS Institute Inc, Cary NC) y se utilizó la prueba de LSD para la comparación de medias. Se realizó un análisis económico mediante el cálculo del margen bruto para el rendimiento promedio de las cuatro cosechas de trigo y las de soja de segunda, con precios de insumos y productos correspondientes al mes de agosto de 2010. La distribución de lluvias para todas las campañas se puede observar en la **Tabla 1**.

Resultados

Respuesta productiva

En todos los cultivos de trigo y soja de segunda hubo diferencias significativas en la respuesta a la fertilización con S (p < 0.05), mientras que el cultivo de soja no respondió significativamente a la aplicación de P en las cosechas del 2004 y 2010 (**Tabla 2**).

La falta de respuesta a la aplicación de P en la soja puede explicarse por las condiciones de estrés hídrico prevalentes durante enero, febrero y marzo del 2004 y durante enero y marzo del 2010. En estas condiciones, el P que tiene poca movilidad y está localizado mayormente en la superficie, está fuera del alcance del sistema radicular y no puede ser absorbido por la planta. En cambio, la respuesta positiva al S de todas las cosechas se explicaría por la mayor movilidad de este nutriente hacia capas profundas que lo expondría menos a las variantes hídricas que ocurren en superficie.

Un estudio realizado por Chao et al. (1962) en columnas de suelo, utilizando ³⁵S un marcador, demostró claramente la migración del S-SO₄²⁻ en profundidad de acuerdo a los volúmenes de riego y las dosis de fertilización. Los

Tabla 1. Distribución de lluvias en Bernardo de Irigoyen, departamento San Jerónimo, provincia de Santa Fe, Argentina.

Meses	Trigo			
	2000-01	2003-04	2006-07	2009-10
	----- mm -----			
Marzo	75	102	87	200
Abril	153	243	70	45
Mayo	215	83	1	12
Junio	32	0	64	7
Julio	29	35	5	63
Agosto	36	67	2	1
Septiembre	76	35	9	123
Octubre	195	55	68	93
Total	811	620	306	544
	Soja de segunda			
Noviembre	197	38	120	150
Diciembre	97	85	330	209
Enero	234	85	95	77
Febrero	96	30	86	268
Marzo	139	82	483	71
Abril	89	165	67	105
Total	852	485	1 181	880

patrones de distribución estuvieron determinados por las características edáficas.

Con excepción del trigo 2000, las interacciones PxS no fueron significativas (p > 0.05), lo cual indicaría que existe un efecto independiente y aditivo de los dos nutrientes.

Las variaciones de los efectos P y S en los cuatro doble cultivos se pueden apreciar en la **Figura 1**.

No se hizo comparación de medias con los datos de trigo 2000 debido a que se presentó una interacción PxS positiva (P > 0.05) entre los factores en estudio (**Figura 1a**). Por su lado, la soja 2001 tuvo respuesta creciente a los niveles de P hasta P40 y hasta S24 con las dosis de S, luego se estabilizó. En el 2003 (**Figura 1b**), el trigo respondió a P20 y P40, en cambio con S solo hubo

Tabla 2. Significancia de los factores P y S y su interacción en la producción de trigo y soja.

Factores	Tr00	Sj01	Tr03	Sj04	Tr06	Sj07	Tr09	Sj10
P	*	*	*	ns	*	*	*	ns
S	*	*	*	*	*	*	*	*
PxS	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

* = significativo al 5 %; ns = no significativo; Tr = Trigo; Sj = Soja.

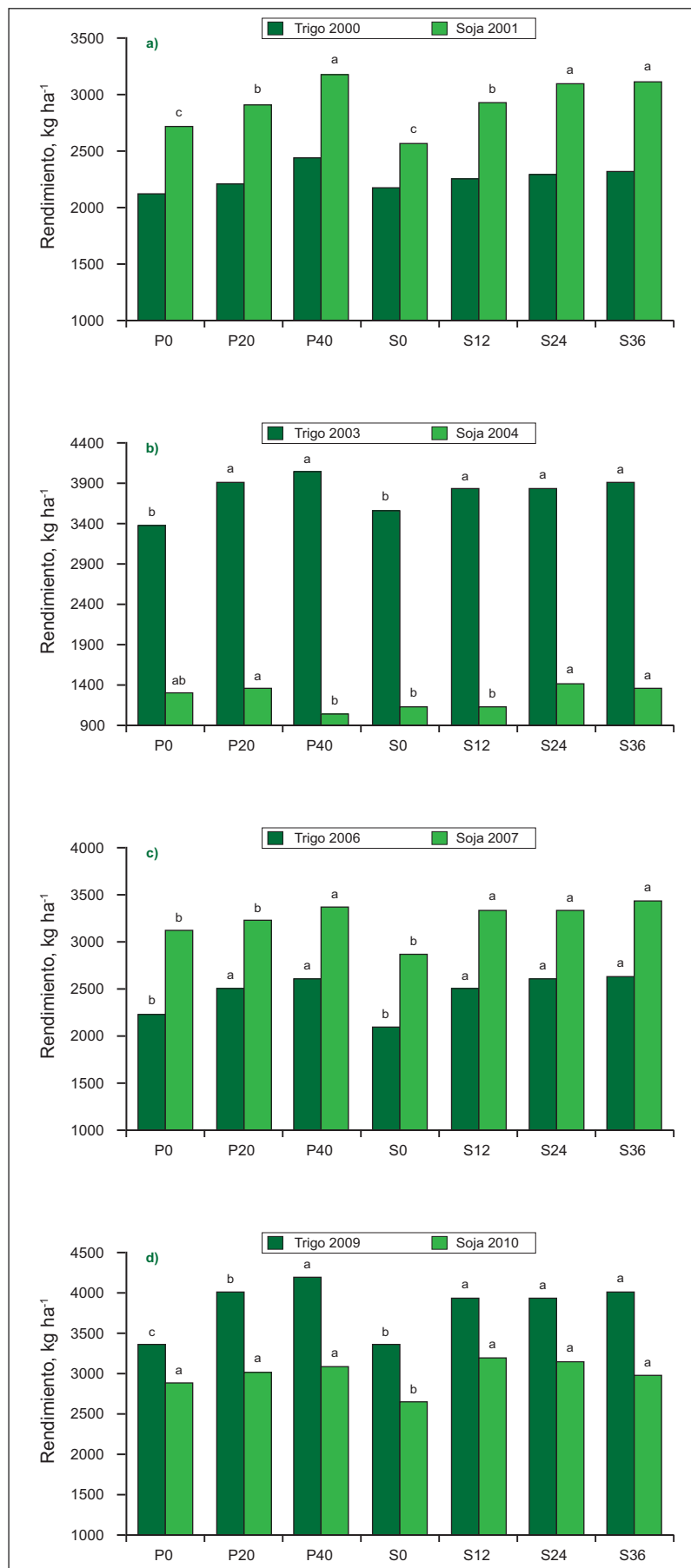


Figura 1. Variación de los rendimientos en relación con la fertilización con P y S en cuatro campañas de doble cultivo: a) Trigo-Soja 2000/01; b) Trigo-Soja 2003/04; c) Trigo-Soja 2006/07; d) Trigo-Soja 2009/10. Medias de tratamientos en cada cultivo y factor seguidas de la misma letra no difieren entre sí (LSD al 5 %).

respuesta hasta S12 y luego se estabilizó. El rendimiento de la soja 2004 tuvo un comportamiento inverso, siendo menor con las mayores dosis de P, debido al déficit hídrico y a la alta demanda de nutrientes del trigo. A pesar del estrés hídrico, las altas dosis de S lograron incrementar los rendimientos.

En el 2006 (**Figura 1c**), el trigo respondió a las dosis de P20 y P40 y solamente a S12. La soja respondió solamente al nivel P40 y al nivel S12. En el 2009 (**Figura 1d**), el trigo respondió a todos los niveles de P y solamente a la dosis S12. Con la soja no hubo respuesta a las dosis de P y para el S fueron suficientes niveles de S12.

Los incrementos porcentuales de cada dosis de P o S respecto de su correspondiente testigo P0 o S0, se pueden ver en el **Tabla 3**. Dada la interacción PxS significativa en el trigo 2000, no se especificaron sus respectivos incrementos porcentuales.

En la **Tabla 3** se observa cómo se destacan los incrementos de rendimiento del trigo en respuesta a la fertilización fosfatada. De igual modo, fue notable la respuesta de la soja de segunda a la fertilización con S. Las últimas dos campañas de trigo se caracterizaron por alta respuesta a la fertilización, tanto con P como con S. Los promedios de las cuatro campañas para trigo y soja en cada una de las doce combinaciones P-S se presentan en la **Figura 2**.

La producción de trigo expresó de mejor forma la respuesta a la fertilización creciente y combinada de P y S. La soja de segunda, por su parte, se destacó por la respuesta al S, pero no respondió a la fertilización fosforada.

Dada la importancia de evaluar la condición de fertilidad residual del suelo posterior a cada doble cosecha, se utilizaron los niveles de Pe como indicador de la disponibilidad de P. En la **Figura 3** puede verse la evolución de este parámetro a través del tiempo. El análisis de la variancia para los datos de Pe detectó diferencias significativas según las dosis de fertilización fosfatada.

Cuando el doble cultivo se condujo sin aplicación de P se produjeron aumentos de producción debido a la fertilización con S (**Figura 2**), pero a través de las campañas el contenido de Pe en el suelo se redujo cada vez más llegando a 5.7 ppm en la campaña 2009/10 (**Figura 3**). En el caso de P20 se observó un pequeño ascenso en el contenido del Pe, respecto a la concentración inicial, alcanzando

Tabla 3. Incrementos porcentuales de la fertilización con P y S respecto de sus testigos, P0 y S0, para cada una de las cosechas. Bernardo de Irigoyen, Santa Fe.

	Tr00*	Sj01	Tr03	Sj04	Tr06	Sj07	Tr09	Sj10
	(%)							
P20	-	7.1	14.8	4.6	12.8	1.5	19.9	4.5
P40	-	17	20.1	-19	17.2	7.6	25.3	7.6
S12	-	14.7	6.7	1.9	20.3	13.6	16.8	19.8
S24	-	20.7	7	24	25.1	16.2	16.7	19.4
S36	-	21.9	9.1	21.1	26	19.6	18.5	12.2

* No se presenta información debido a la existencia de interacción significativa P x S.

un valor de 13.1 ppm en 2010, que fue significativamente diferente del P0, pero no llegó a valores de 15 ppm deseables para la rotación. Con la dosis P40, el contenido de Pe fue superior a los 15 ppm en el 2004, 2007 y 2010, con diferencias significativas respecto a P0 y a P20 (Figura 3).

Respuesta económica

La fertilización con P y S no solo produjo aumentos significativos en los rendimientos, sino también beneficios económicos (Figura 4). Los márgenes de ingreso bruto fueron mayores siempre que se fertilizó con S (solo o en combinación con P). El P tuvo efecto positivo, pero la respuesta se potenció cuando la aplicación de P se combinó con la aplicación de S, alcanzando beneficios de 2 378, 2 498 y 2 417 US\$ ha⁻¹ para los tratamientos P20-S12, P20-S24 y P20-S36, respectivamente. Las combinaciones de S con P40 tuvieron mayor producción de grano, pero los márgenes fueron menores debido al mayor costo del fertilizante fosfatado. Los beneficios fueron de 2 295, 2 334 y 2 364 US\$ ha⁻¹ para los tratamientos P40-S12, P40-S24 y P40-S36, respectivamente.

Cuando no se aplicó P, los márgenes fueron también importantes: 2 366, 2 387 y 2 328 US\$ ha⁻¹ para los tratamientos P0-S12, P0-S24 y P0-S36, respectivamente. Sin embargo, es preciso indicar que esta situación no es aconsejable en suelos deficientes en P y debido a que la mayor producción acentúa la deficiencia y degrada el suelo aun cuando se observen resultados económicamente positivos durante los primeros años.

La dosis P40 no solo incrementó el contenido de Pe a niveles deseables, sino que también provocó incrementos apreciables de rendimiento (Figura 3). La combinación de P con las dosis de S también aumentó la producción, pero los márgenes decayeron por el mayor costo del fertilizante, (Figura 4). La

combinación de P20 con las dosis crecientes de S produjo los mayores márgenes de ingreso bruto y el Pe residual, si bien es inferior al contenido deseable, es cercano a este valor (Figuras 3 y 4).

Conclusiones

- ◆ En las cuatro campañas de doble cultivo siempre se presentaron beneficios productivos y económicos, tanto en trigo como en soja, promovidos por la fertilización con P y S.

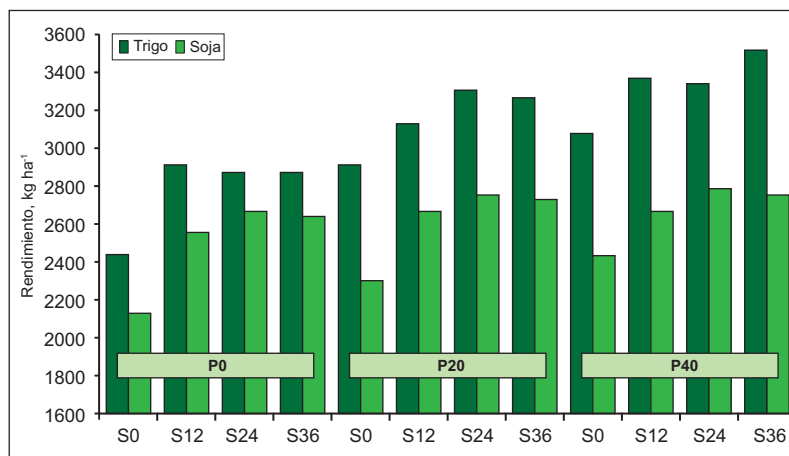


Figura 2. Producción de trigo y soja de segunda para las diferentes combinaciones de P y S. Promedio de las cuatro campañas conducidas en Bernardo de Irigoyen, Santa Fe.

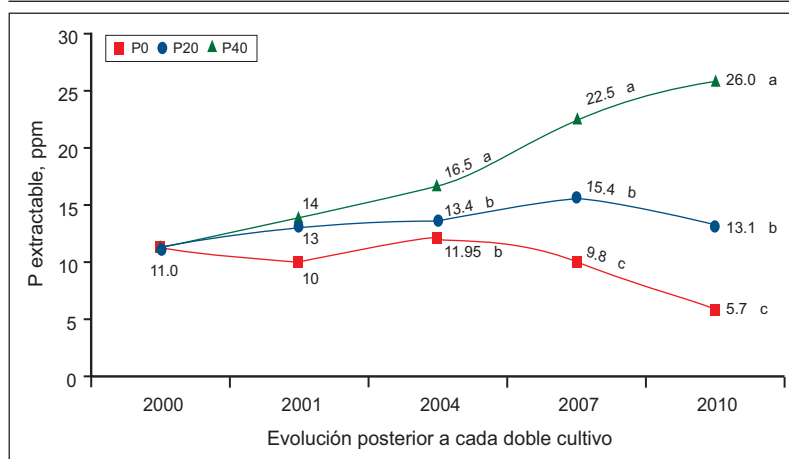


Figura 3. Evolución del contenido de Pe del suelo (0-20 cm) luego de cada doble cultivo trigo/soja en Bernardo Irigoyen, Santa Fe. Medias con igual letra en cada año no difieren entre sí (LSD al 5 %).

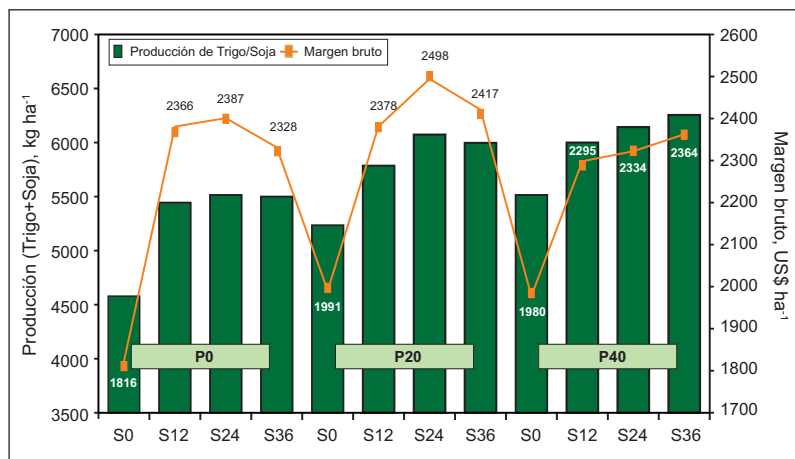


Figura 4. Producción promedio de cuatro campañas de trigo y soja de segunda y margen bruto correspondiente a cada combinación de fertilización con P y S en Bernardo de Irigoyen, Santa Fe. Precios de insumos y productos en base al mes de agosto de 2010.

- ◆ Aunque ambos cultivos respondieron a las combinaciones de P y S, el trigo se destacó por su respuesta a la fertilización con ambos nutrientes, mientras que la soja mostró respuestas principalmente al S.
- ◆ Los mayores rendimientos no siempre produjeron los mayores márgenes de ingreso bruto.
- ◆ La combinación P20 y S24 permitió obtener el mayor margen bruto sin reducir los valores iniciales de Pe.
- ◆ La provisión de 40 unidades de P para el doble cultivo, en combinación con S, permitió una adecuada provisión de nutrientes y una evolución favorable de los niveles de Pe.

Agradecimiento

Los autores agradecen a los Estadísticos Oscar Quaino y Alejandra Cuatrín (INTA EEA Rafaela) y Belén Conde (INTA EEA Marcos Juárez) por su contribución para este artículo.

Bibliografía

Albrecht, R., H.S. Vivas, H. Fontanetto, y J.L. Hotian. 2000. Residualidad del P y del S en soja sobre dos secuencias de cultivos. Campaña 1999-2000. En. Información Técnica de Soja y Maíz de Segunda. Campaña 2000. INTA EEA Rafaela. Publicación Miscelánea No. 93.

Chao, T.T., M.E. Harward, and S.C. Fang. 1962. Movement of S35 Tagged Sulfate Through Soil Columns. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 26:27-32.

García, F.O., H. Fontanetto, y H.S. Vivas. 2001. La Fertilización del doble cultivo trigo-soja. INTA EEA Rafaela. Información Técnica de Trigo. Publicación Miscelánea No. 94.

Geniletti, A., y F.H. Gutiérrez Boem. 2004. Fertilización azufrada del cultivo de soja en el centro-sur de Santa Fe. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. 24, 12-

14. Acassuso, Bs As, Argentina.

Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, and W. L. Nelson. 1999. Soil Fertility and Fertilizers. An introduction to Nutrient Management. Sixth Edition. Prentice-Hall, Inc.

Mizuno, J., B. de Lafaille, y L.G. de López Camelo. 1990. Caracterización del azufre en algunos molisoles de la provincia de Buenos Aires. Ciencia del Suelo 8:111-117.

Olsen, S.R., W.D. Kemper, and J.D. Jackson. 1962. Phosphate diffusion to plant roots. Soil Sci. Soc. Am Proc. 26:222-227.

Ozanne, P.G. 1962. Phosphate Nutrition of Plants. A General Treatise. In. The Role of Phosphorus in Agriculture (ed.) F.E. Khasawneh, E.C. Sample, E.J. Kamprath. ASA-CSSA-SSSA.

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

Stevenson, F.J. 1986. The Sulfur Cycle. In. Cycles of Soil. Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley and Sons.

Vivas, H.S., R. Albrecht, y J.L. Hotian. 2005. Manejo del fósforo y el azufre en una secuencia de cultivos del centro de Santa Fe. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. No. 28. p 16-18.

Vivas, H.S., R. Albrecht, J.L. Hotian, y L. Gastaldi. 2006. Residualidad del fósforo y del azufre. Estrategia de fertilización en una secuencia de cultivos. 2003-2006. INTA EEA Rafaela. Publicación Miscelánea No. 106.

Vivas, H.S., R. Albrecht, J.L. Hotián, y O. Quaino. 2007. Relación del fósforo y del azufre asociada a la respuesta del doble cultivo trigo/soja en un suelo del centro de Santa Fe. INTA EEA Rafaela. Información Técnica de Cultivos de Verano. Publicación Miscelánea No. 108.

Vivas, H.S., N. Vera Candiotti, R. Albrecht, y J.L. Hotián. 2009. Fósforo y Azufre sobre soja de 1° en rotación con gramíneas. Región central de Santa Fe. INTA EEA Rafaela. Información Técnica de Cultivos de Verano. Publicación Miscelánea No. 115. p. 57-65.

Vivas, H.S., N. Vera Candiotti, R. Albrecht, L. Martins, O. Quaino, y J.L. Hotian. 2010a. Efecto aditivo de la fertilización con fósforo y azufre sobre trigo en una rotación. INTA EEA Rafaela. Información Técnica de Trigo y otros cultivos de invierno. Publicación Miscelánea No. 116. p. 61-67.

Vivas, H.S., N. Vera Candiotti, R. Albrecht, L. Martins, O. Quaino, y J. L. Hotian. 2010b. Fósforo y Azufre en una Secuencia de Cultivos para una Fertilización cada dos cosechas. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bolsa de Comercio de Rosario. p. 138.❖