

CONSIDERACIONES SOBRE EL MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN DE LA SOJA

FONTANETTO, Hugo; KELLER, Oscar

Profesionales del INTA EEA Rafaela

Más del 95 % de la producción mundial de soja se concentra en cuatro países: Argentina, Brasil, Estados Unidos y China; registrándose en nuestro país un fuerte aumento del área sembrada en la última década, pasando de 4.966.600 ha en 1.990 a 12.630.000 en el 2.002. El área pampeana es donde se registró la mayor expansión del cultivo, pero también se incorporaron nuevas zonas a su cultivo, como el NOA, donde el área cultivada pasó del 7 % del total nacional en 1.990 al 20 % en el 2.002. Los rendimientos promedios de Argentina aumentaron de 2.187 kg/ha en 1.990 a 2.772 kg/ha en la campaña 2002/03, con una tasa de incremento anual de 49 kg/ha; debiéndose este aumento al mejoramiento genético y a la implementación de mejores prácticas de manejo del suelo y del cultivo (García, 2004). Tal es así que en condiciones mejoradas de manejo del cultivo se observan rendimientos que llegan a duplicar los promedios regionales; siendo el empleo de la siembra directa, las adecuadas rotaciones de cultivos y el manejo integral de la nutrición mineral, los elementos que contribuyen para el mejoramiento de sus rendimientos.

Son varios los trabajos que demuestran que los lotes de mayor producción son en su mayoría los que fueron fertilizados e inoculados y en los que el cultivo antecesor predominante fue el maíz. Otras de las prácticas de manejo que contribuyeron al logro de los altos rendimientos fueron sistema y fecha de siembra y grupo de madurez (Díaz-Zorita, 2003).

Respecto a las necesidades de nutrimentos minerales, la soja es el cultivo de más altas exigencias y el de mayor índice de cosecha de nutrientes, tal como puede observarse en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Requerimientos totales y partición de nutrientes en soja, maíz y trigo (García, 2000).

Nutriente	Requerimientos Totales			Indice de Cosecha		
	Soja	Maíz	Trigo	Soja	Maíz	Trigo
	----- kg/tn grano -----			----- % -----		
Nitrógeno (N)	80	22	30	75	66	66
Fósforo (P)	8	4	5	84	75	75
Potasio (K)	33	19	19	59	21	17
Calcio (Ca)	16	3	3	19	7	14
Magnesio (Mg)	9	3	3	30	28	50
Azufre (S)	7	4	4,5	67	45	25
Boro (B)	0,025	0,020	0,025	31	25	
Cloro (Cl)	0,237	0,444		47	6	
Cobre (Cu)	0,025	0,013	0,010	53	29	75
Hierro (Fe)	0,300	0,125	0,137	25	36	
Manganeso (Mn)	0,150	0,189	0,070	33	17	36
Molibdeno (Mo)	0,005	0,001		85	63	
Zinc (Zn)	0,060	0,053	0,052	70	50	44

Los elementos que más limitan la producción de la soja en Argentina, del total de los requeridos por el cultivo para su desarrollo y producción, son el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el azufre (S). La ocurrencia de deficiencias de otros elementos, como calcio (Ca), cobalto (Co), molibdeno (Mo) o boro (B) son menos frecuentes y no presentan la importancia de las de N, P y S. El objetivo de este artículo es presentar información y analizar criterios para un eficiente manejo de la fertilización con N, P y S en soja.

NITROGENO

El nitrógeno (N) es el elemento que más limitante para la producción de la soja, debido a su alta demanda (80 kg/tn

de grano, Cuadro 1). Los síntomas de deficiencia de N en soja se manifiestan por una disminución

en el crecimiento y en la altura de las plantas y por una clorosis que se da primeramente en las hojas más viejas (las inferiores) y que luego se extiende por toda la planta. La provisión de N en la soja se da por dos mecanismos: absorción desde el suelo y fijación biológica (FBN) mediante la simbiosis con microorganismos del género *Bradyrhizobium* sp.

Fijación biológica del nitrógeno atmosférico

La soja obtiene entre el 25 y el 75 % de sus requerimientos nitrogenados a través del mecanismo de fijación

biológica, que es energéticamente costoso para la planta (6-12 g de carbohidratos por cada g de N fijado) por lo que es común observar estrechas relaciones entre crecimiento del cultivo y fijación biológica. Por lo tanto factores que restrinjan el crecimiento limitarán la fijación biológica del N y reducirán la eficiencia de este proceso. En general, este proceso comienza 30 días después de la siembra, aumenta hasta alcanzar un máximo durante el período reproductivo e inicio del llenado de los granos y disminuye a partir del estadio de desarrollo de R5 (Zapata y col. 1987). Los requerimientos de N hasta floración con cubiertos mayormente a partir de la oferta edáfica mientras que los aportes por fijación biológica son muy importantes luego de la floración y durante el llenado de los granos.

La ocurrencia de limitantes de índole ambiental y de nutrición química que afecten al normal desarrollo de los cultivos, afectarán también la tasa de acumulación del N por lo que variaciones en la cantidad fijada de N se deben a la ocurrencia de factores que afectan a este proceso (ej: temperaturas extremas, sequía, anaerobiosis en condiciones de excesos hídricos o compactación y presencia de altos contenidos de N del suelo).

En los suelos de la región pampeana es frecuente observar relevantes aumentos de rendimientos (aproximadamente 1000 kg/ha o más) al inocular en lotes sin antecedentes recientes de cultivos de soja inoculados. La repetida inoculación con

un inoculante de buena calidad favorece la nodulación y en campos con antecedentes de soja aumenta las posibilidades de infección con cepas seleccionadas explicando la observación de aumentos en rendimientos por reinoculación.

En estos lotes la diferencia por inoculación es de menor magnitud.

En estudios de fertilización e inoculación de soja se observó que la respuesta al agregado de fertilizantes también se incrementa en los tratamientos con inoculación, tal como se puede apreciar el efecto del agregado de P y de S en parcelas con y sin inoculación y en lotes con diferente historia de manejo previo: 1-agricultura continua en siembra directa (ACSD) y 2- pastura de alfalfa degradada (PAD) ubicados en la localidad de Videla, departamento San Justo, del área centro-oriental de Santa Fe, en el extremo norte de la región pampeana (Figuras 1 y 2). Para ambos antecesores la nodulación fue afectada por los tratamientos de inoculación y fertilización tanto con P como con S sin mostrar interacciones significativas entre los mismos ($P < 0,05$). En promedio y para todos los niveles de fertilización con P y con S, se determinó mayor cantidad de nódulos en los tratamientos inoculados que en los sin inocular de 9,3 y 7,2 nódulos planta⁻¹ para ACSD y de 7,7 y 6,4 nódulos planta⁻¹ para PDA, respectivamente. La fertilización con 10 kg ha⁻¹ de S también indujo a mejoras significativas en la nodulación de los cultivos, siendo más altos para el sitio 1 que para el 2 (Figura 1). El agregado de P

provocó aumentos lineales en la nodulación a razón de 19 nódulos planta⁻¹ cada 100 kg ha⁻¹ de P aplicados.

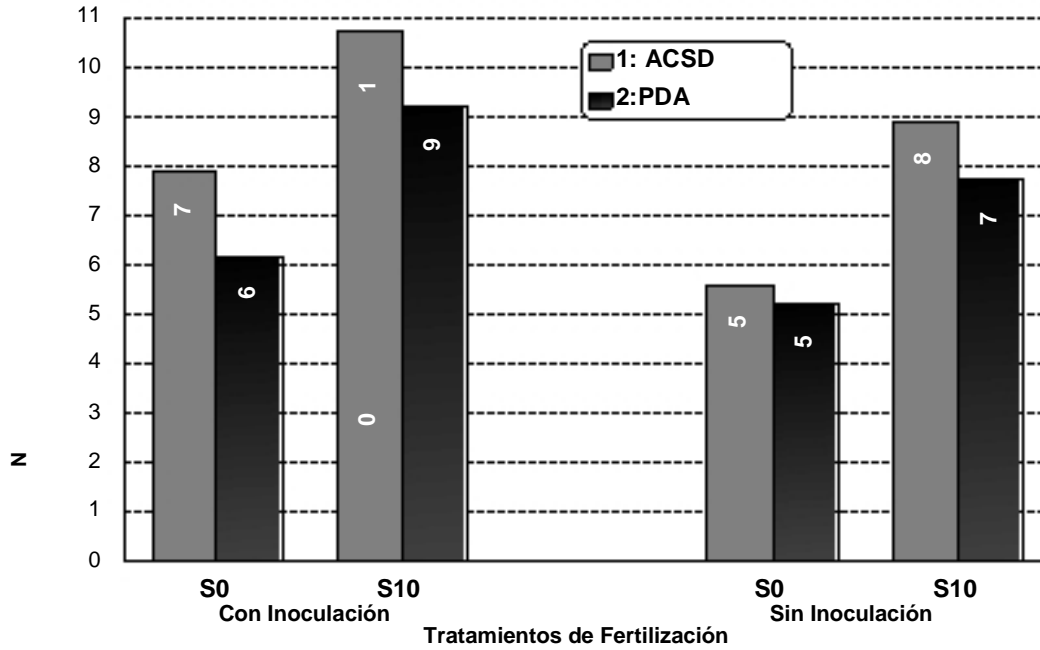


Figura 1. Efecto del S sobre la nodulación de la soja al estado de V6 para dos antecedentes de la localidad de Videla, Santa Fe. Campaña 2002/03.

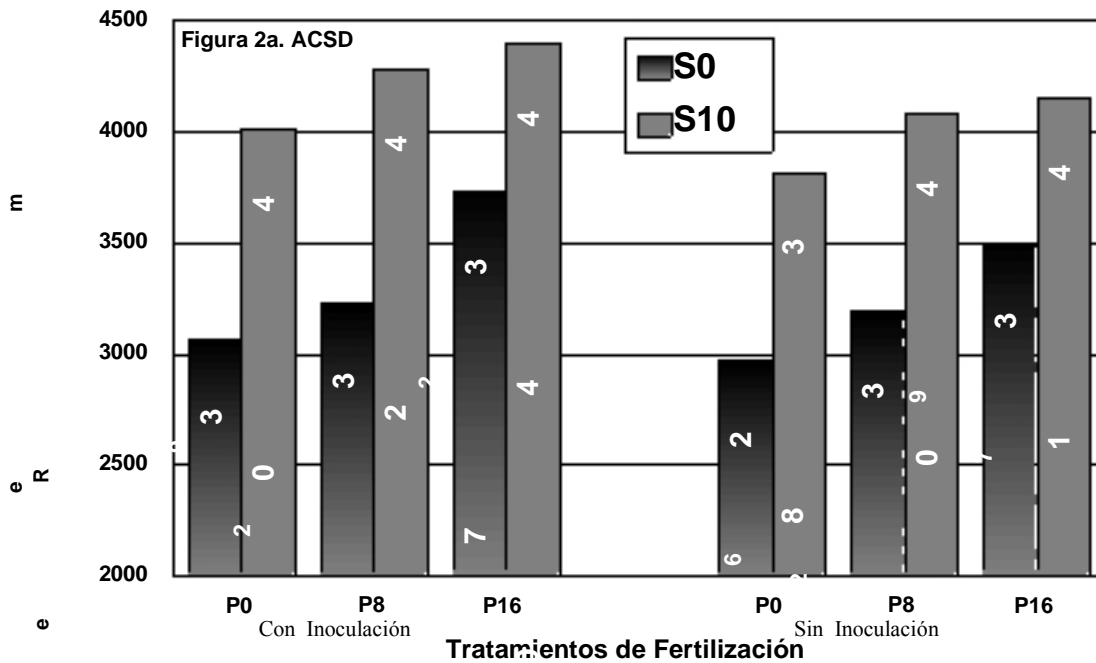


Figura 2a. Producción de granos de soja con distintos niveles de P, de S y de inoculación para el antecesor ACS D. Campaña 2002/03.

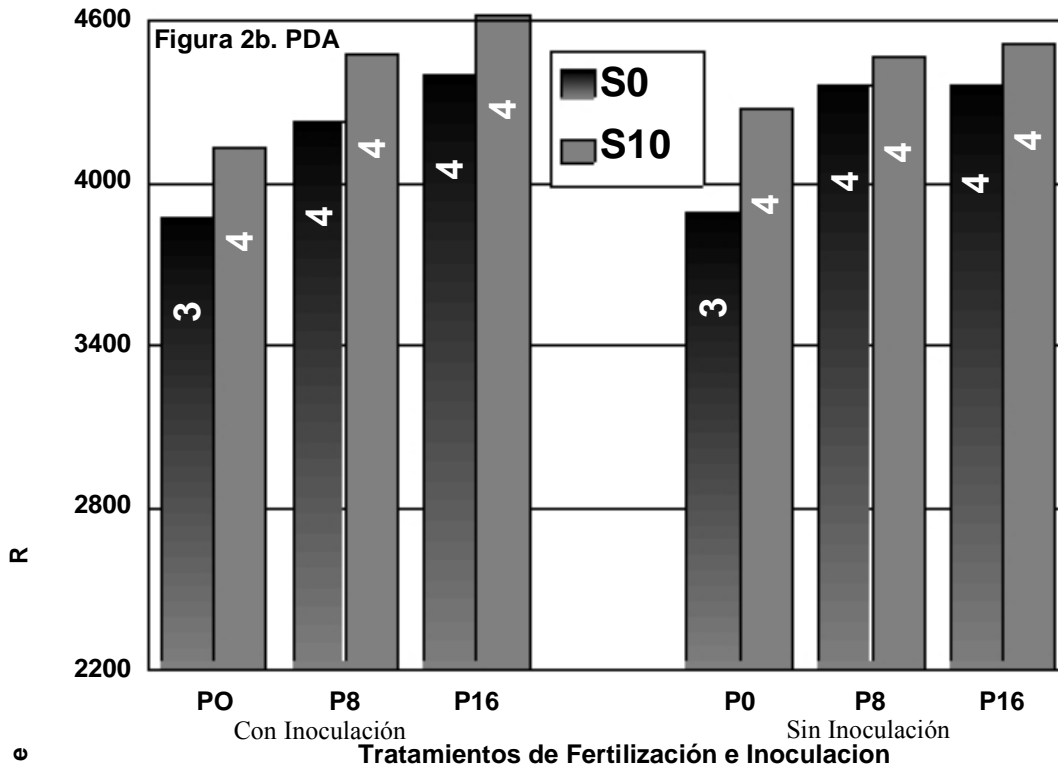


Figura 2b. Producción de granos de soja con distintos niveles de P, de S y de inoculación para el antecesor PDA. Campaña 2002/03.

En ACS D los rendimientos en granos variaron entre 2.840 y 4.514 kg . ha⁻¹, mostrando diferencias según tratamientos de fertilización con P, con S y de inoculación y sin interacciones significativas entre los mismos. Para el antecesor PDA las producciones fluctuaron entre 3.702 y 4.792 kg . ha⁻¹, arrojando diferencias significativas para el P y el S, pero no significativas para los tratamientos de inoculación (Figura 2a). En promedio, para los tratamientos de fertilización con P y con S, la producción de grano en los tratamientos inoculados fue un 5,4% mayor que los sin inocular.

La aplicación de S permitió aumentos (a través de los niveles de P y los de inoculación del 25,3 % (Figura 2b). La producción de granos

mostró una respuesta lineal al agregado de P con una eficiencia media de 30,22 kg de grano . kg de P⁻¹ (Fontanetto y col., 2004).

Fertilización nitrogenada

Las experiencias de fertilización nitrogenada en soja son vastas y los resultados en general muestran resultados variables, algunos con efectos positivos sobre la producción (Bashir Al-Ithawi et al., 1980) y otros con falta de respuesta a

su agregado (Beard and Hoover, 1971 ; Welch et al., 1973). En líneas generales se menciona que ocurre una sustitución del N fijado por el aportado por los fertilizantes, determinándose que no hay incrementos en la asimilación neta del nutriente (Diebert y col. 1979; Ghelfi y col. 1984). Lo anteriormente mencionado significa que con aumentos en la cantidad de N absorbido del fertilizante se da una disminución en la cantidad de N fijada por FBN (Figura 3).

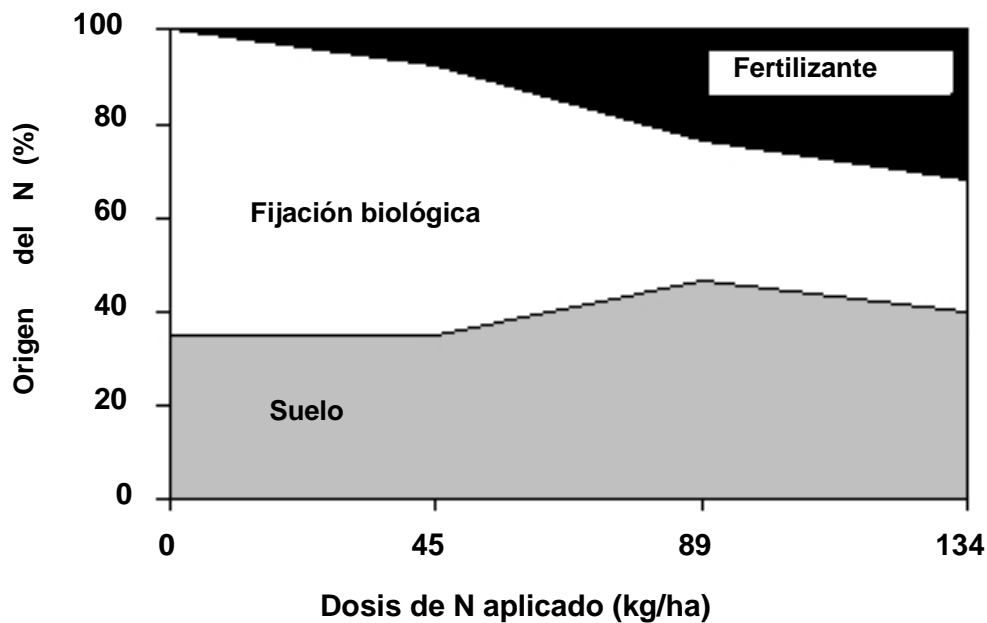


Figura 3. Cambios en el origen del N en cultivos de soja según dosis de fertilización nitrogenada (Diebert y col. 1979)

En la región pampeana Argentina se reportaron respuestas de la soja al agregado de n como fertilizante en situaciones de suelos que no tenían soja como cultivo previo a la experiencia y con cultivos de soja que no se habían

inoculado. En lotes con antecedentes de soja como cultivo previo, no se registraron efectos al agregado de N (Bodrero et al., 1984 y 1985; Barbagelata et al., 2001). En la región pampeana norte los resultados fueron variables,

encontrándose respuestas en algunos sitios y en otros no y también respuestas al agregado de N en etapas tardías del cultivo y con pulverizaciones al follaje (Fontanetto et al, 2001). Por lo mencionado, la fertilización nitrogenada aparentemente sería eficiente cuando no se inoculan las semillas y cuando ocurren fallas en la nodulación que se manifiesten con los típicos síntomas visuales de deficiencia de N.

El adecuado manejo de la nutrición nitrogenada en soja debe contemplar como norma general en primera instancia una efectiva y eficiente nodulación, mediante inoculación de las semillas con cepas seleccionadas de *Bradyrhizobium japonicum*, tanto en lotes con o sin antecedentes de cultivos de soja. El uso de fertilizantes que también incorporen N a la siembra solamente debe efectuarse con dosis que no superen los 20 kg/ha de N, de manera de no afectar la nodulación ni los rendimientos del cultivo (Racca, 2002 ; Scheiner et al, 2000).

FÓSFORO

Este elemento, es el segundo elemento limitante para la producción de cultivos luego del N. La soja para producir una tonelada de grano requiere unos 8 kg de P, cantidad que es mayormente exportada en la cosecha. Las deficiencias de P reducen el crecimiento de las plantas, hojas pequeñas, de color verde oscuro y de mayor grosor (Gutiérrez Boem y Thomas, 2001). Las reducciones en los rendimientos como consecuencia de

deficiencias en la oferta de P se explican mayormente por reducciones en el número de los granos al afectar el área foliar y consecuente captación de la radiación en estadios tempranos de desarrollo del cultivo (Gutiérrez Boem y Thomas, 1999).

Para el eficiente manejo de la nutrición fosfatada del cultivo es conveniente estimar la capacidad del suelo para proveer este elemento recomendándose en gran parte de las áreas agrícolas de Argentina la determinación del contenido de P extractable de los suelos (método de Bray Kurtz 1) a 0 a 20 cm de profundidad. Por ello, es esencial conocer los niveles de P del suelo de la región donde se trabajará con el cultivo de soja, tal como se detallan en la siguiente figura:

**Profundidad del Suelo
(cm)**

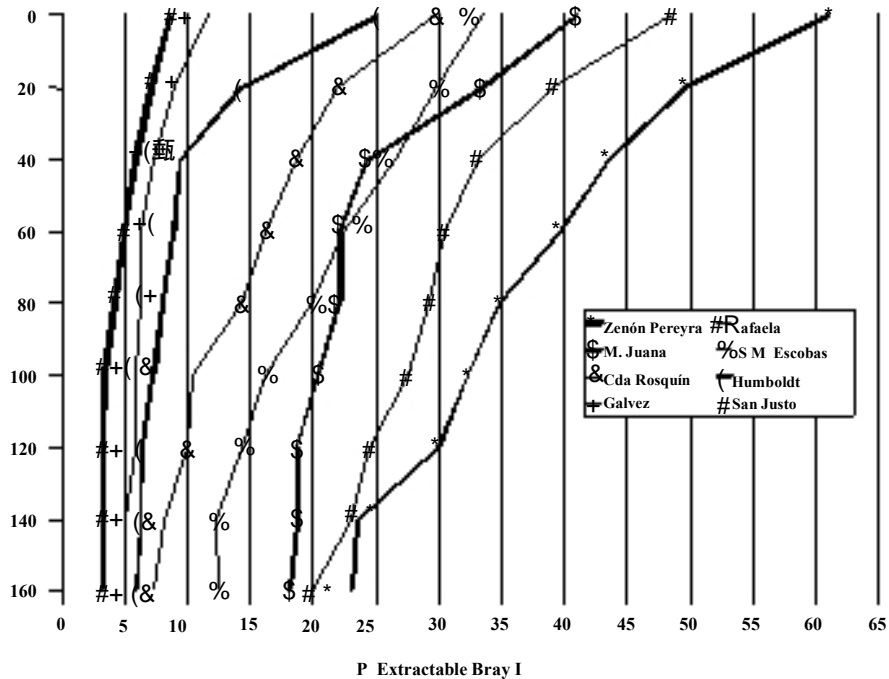


Figura 4. Niveles de P extractable del suelo hasta 1,60 m de profundidad para ocho sitios de la región central de Santa Fe (Fontanetto y Keller, 2004).

Varios estudios se han realizado en Argentina para relacionar los niveles extraídos de P de los suelos con la respuesta de soja a la fertilización fosfatada, concluyéndose que es posible obtener respuestas en rendimiento de grano al fertilizar en suelos con contenidos de P extractable inferiores a las 12 ppm (Díaz-Zorita y col. 2002 ; Melgar y col. 1995 ; Barbagelata y col. 2000 ; Melchiori y col. 2002 y Sanchez y Lizondo, 1999). Un estudio conducido durante las campañas agrícolas 2003/04 y 2004/05 en las provincias de Entre Ríos, Buenos Aires y Santa Fe arrojó los resultados que se detallan en el siguiente cuadro:

Cuadro 2. Rendimientos en granos de la soja y respuesta al agregado de dosis crecientes de P (0, 10, 20 y 30 kg/ha de P) para tres zonas del área pampeana Argentina (Melchiori et al., datos no publicados).

Zona	Campaña 2003/04 (n = 15 sitios)			Campaña 2004/05 (n = 16 sitios)		
	Entre Ríos	Santa Fe	Bs. As. y S Sta. Fe	Entre Ríos	Santa Fe	Bs. As. y S Sta. Fe
Rendimientos medios (kg/ha)	1613-3815	2880-5318	2752-4282	2491-4746	2281-4231	3203-4776
Respuestas máximas al P (kg/ha)	717 (P30)	1090 (P30)	849 (P30)	1013 (P20)	1034 (P30)	602 (P30)
Sitios "con respuesta" (RR < 0,95)	5 (100%)	5 (100%)	4 (80%)	3 (50%)	5 (100%)	2 (40%)
Sitios "sin respuesta" (RR > 0,95)	----	----	1 (20%)	3 (50%)	----	3 (60%)

Del mismo estudio surgieron niveles críticos para P en granos y su relación con los rendimientos, como se detalla en el Cuadro 3 y en la Figura 4.

Cuadro 3. Concentración media de P en grano en función de la dosis de P (campaña 2003/04, promedio de 15 sitios).

Tratamiento	Dosis de P (kg/ha)	Concentración de P en grano (%)
P0	0	0,350 a
P10	10	0,365 b
P20	20	0,385 c
P30	30	0,395 c

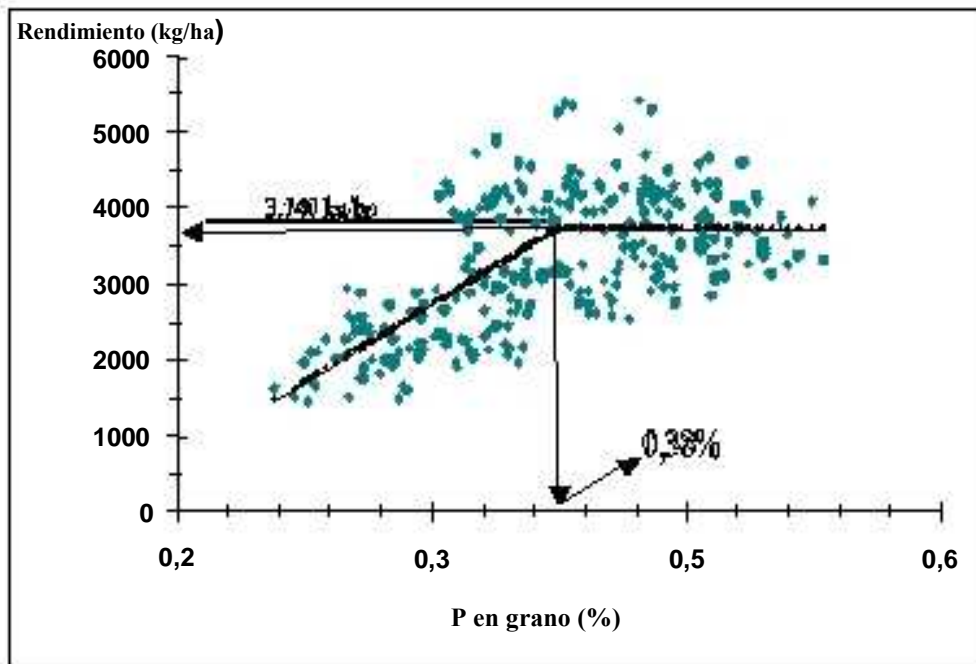


Figura 4. Relación entre el contenido de P en granos de soja (%) y los rendimientos de granos (campaña 2003/04, N: 15 sitios).

Las dosis de fertilizantes a aplicar dependen de los contenidos de P del suelo y de los rendimientos esperados del cultivo. A tal efecto se han confeccionado tablas con recomendaciones de dosis de fertilización con P que tienen en cuenta los rendimientos esperables del cultivo y el contenido del suelo como herramientas de diagnóstico (Cuadro 4).

Cuadro 4. Dosis de fertilizantes fosfatos recomendados para suelos del sudeste bonaerense según niveles de extractables de P (Bray Kurtz 1) y de rendimientos esperados (Echeverría y García, 1998)

Rendimiento (kg/ha)	Nivel de P extractable del suelo (ppm)				
	< 4	4 - 6	6 - 8	8 - 11	11 - 16
	----- Dosis de P ₂ O ₅ (kg/ha) -----				
2000	43	33	28	24	---
2500	49	39	34	30	---
3000	55	45	40	36	25
3500	61	51	46	42	31
4000	67	57	52	48	37
4500	73	63	58	54	43

En el caso de la secuencia trigo/soja se ha observado que las prácticas de fertilización aplicadas al trigo influyen sobre la soja de segunda y que en el caso de tratamientos con nutrientes poco móviles en el suelo (por ejemplo P) es posible dejar remanentes aprovechables directamente por la soja (Fontanetto y col. 2003; Salvagiotti y col. 2003).

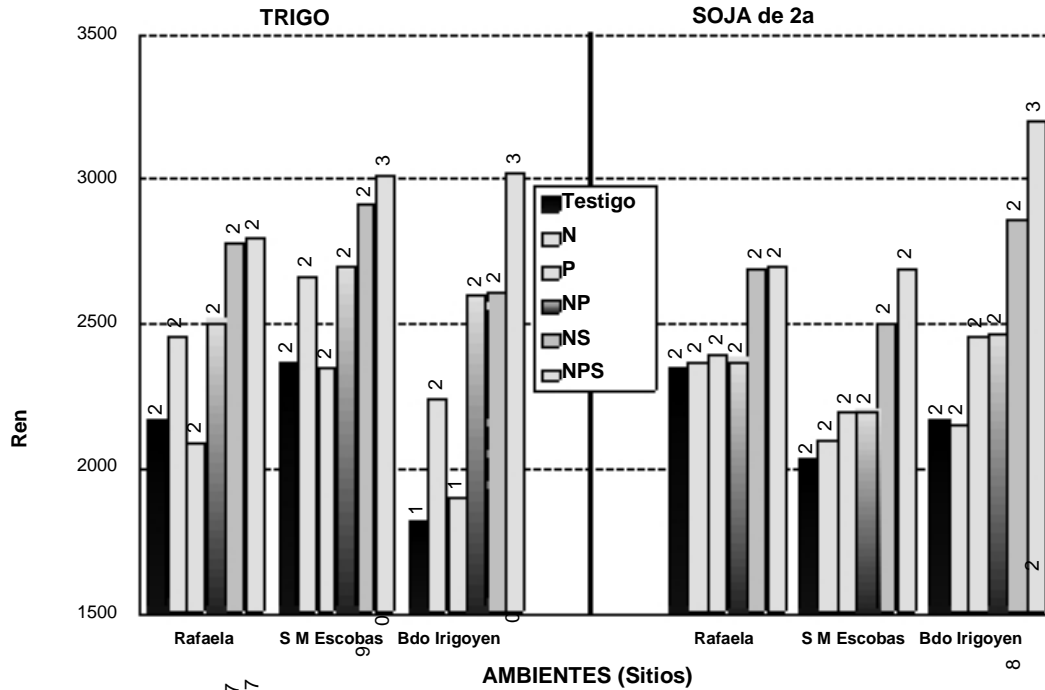


Figura 5. Rendimientos promedios (3 años: 2000/01/02) del Trigo y de la Soja de 2a. con diferentes combinaciones de N-P-S aplicadas a Trigo.

Los resultados indican la diferente respuesta del trigo en cada área y la marcada residualidad del agregado de P y de S aplicados en el mismo para la soja de 2a.

Los resultados de cinco ensayos ubicados en el sur de Santa Fe muestran que los rendimientos de soja de segunda no muestran diferencias a la fertilización con P según momentos de aplicación, dosis completa en la siembra del trigo o fraccionada en cada cultivo (Figura 6).

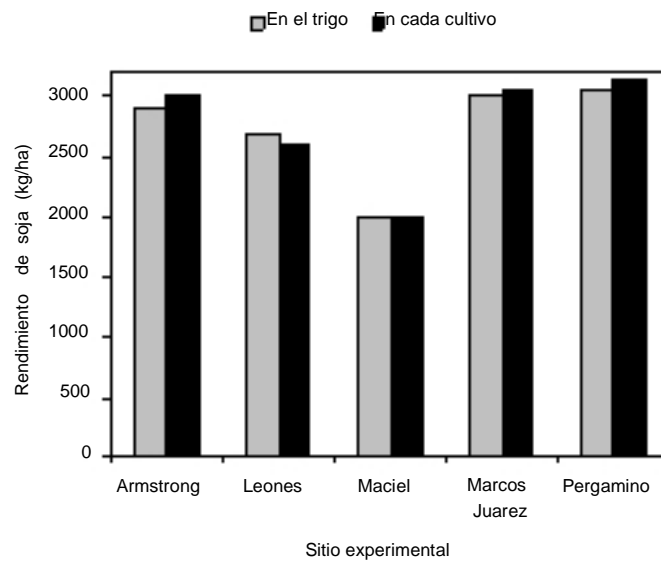


Figura 6. Rendimiento de soja según momentos de fertilización con P, en trigo para la secuencia o en cada cultivo (Adaptado de Salvagiotti y col. 2003).-

Las semillas de soja son muy sensibles a los efectos salinos y fitotóxicos de fertilizantes aplicados en contacto directo con estas que las semillas de los cereales (Figura 7). Como consecuencia de este daño se observan reducciones en el porcentaje de plantas emergidas que afectando la uniformidad de implantación del cultivo.

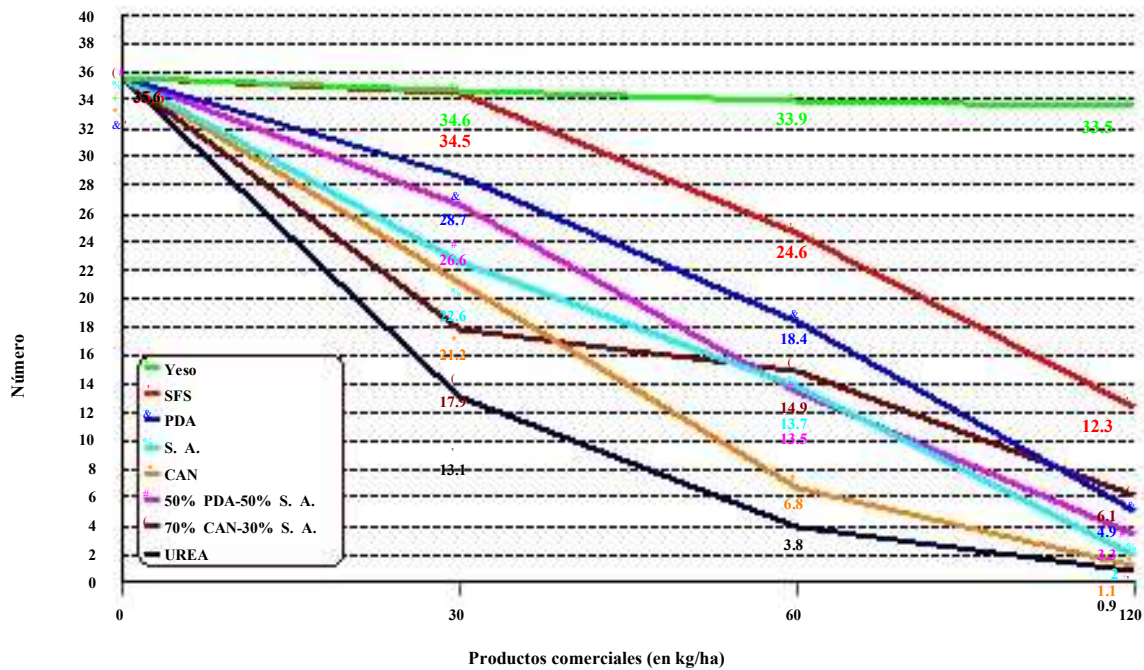


Figura 7. Toxicidad de diferentes fertilizantes aplicados junto con las semillas de la Soja.

En la campaña 2004/05 se evaluó la eficiencia de fuentes sólidas y líquidas de P bajo diferentes formas aplicación al cultivo. Los resultados se detallan en la Figura 8.

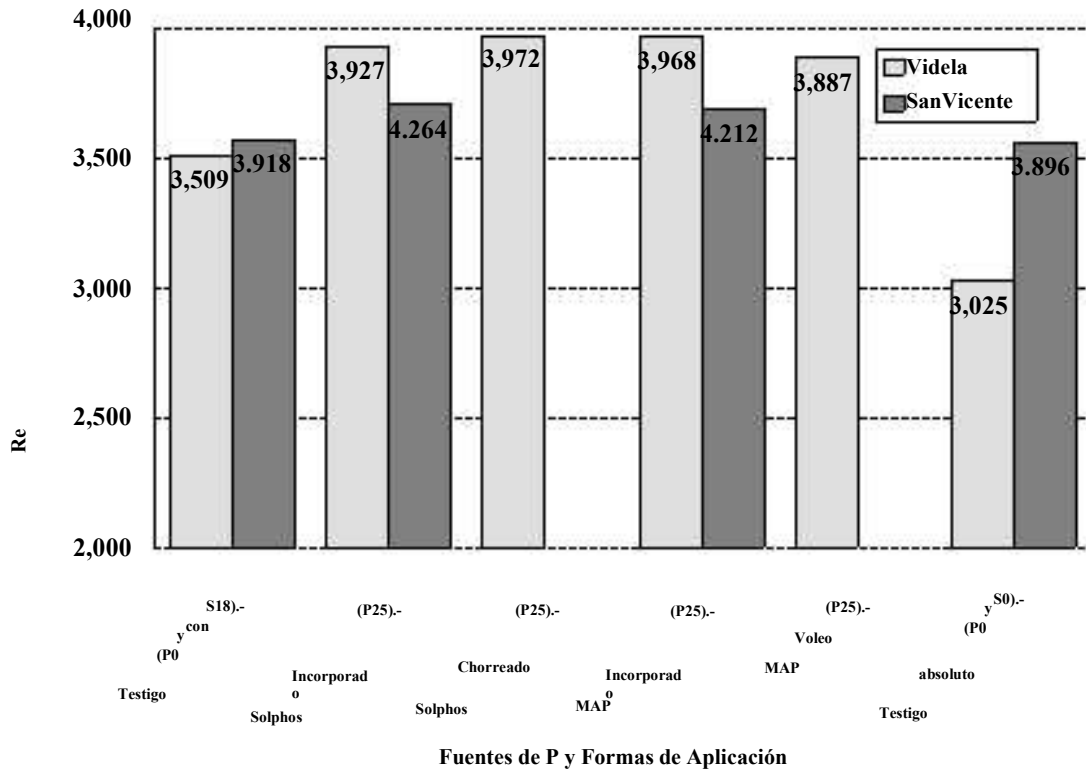


Figura 8. Fuentes de P y formas de aplicación en soja (campaña 2004/05).

La eficiencia de ambas fuentes de P (Solphos líquido vs. PMA sólido) fue similar en los dos sitios ensayados y con las diferentes formas de incorporación también presentaron un comportamiento semejante.

Las aplicaciones al voleo de fertilizantes fosfatados están demostrando una eficiencia similar a las incorporadas al suelo, siempre que los lotes tengan como mínimo 6 años en siembra directa continua y las dosis a agregar sean superiores a los 20 kg/ha de P. Al respecto se realizó una experiencia en la zona de Videla (Santa Fe) en la campaña 2003/04 donde se comparó la aplicación al voleo versus la incorporada al suelo en el doble cultivo trigo/soja 2a., el fertilizante utilizado fue fosfato monoamónico (PMA) y aplicado en el trigo en dosis de 200 kg/ha. La experiencia se realizó sobre un suelo con los siguientes parámetros químicos: MO: 2,3% ; Nt: 0,115 % ; P (Bray I): 9,2 ppm ; S-SO₄ : 5,4ppm y pH: 5,8 y los resultados se detallan en la Figura 9.

Hubo una alta respuesta a la fertilización con P en el trigo y ambas formas de aplicación del mismo fueron similares entre sí. Asimismo, se evidenció una alta residualidad del P para la soja de 2a., donde tampoco hubo diferencias entre las formas de aplicación del fertilizante (Figura 9).

Rendimiento en Granos (kg/ha)

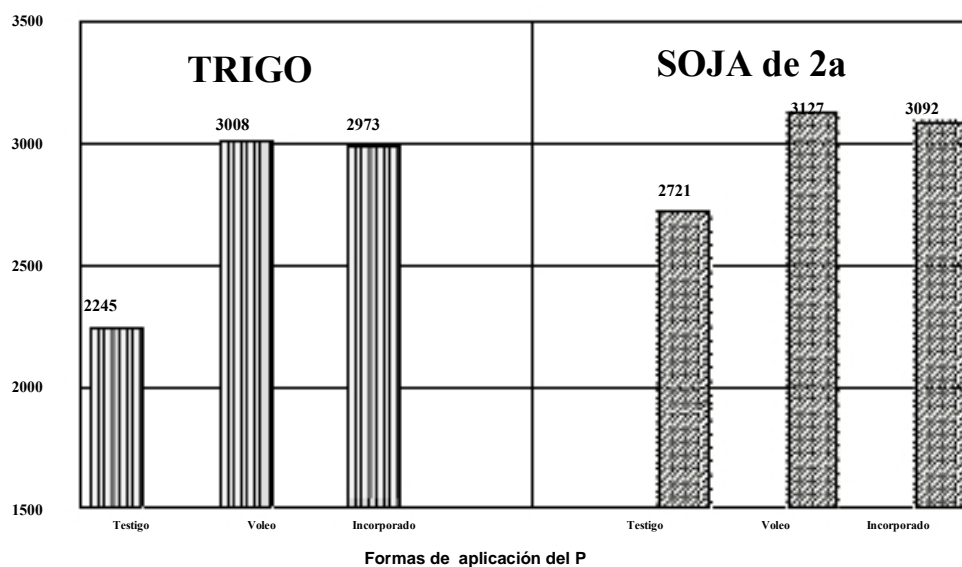


Figura 9. Efecto de distintas formas de aplicación del P en el doble cultivo trigo/soja 2a. en el área de Videla (campaña 2003/04).

AZUFRE

El azufre (S) es requerido a razón de unos 7 kg/tn de grano producidos (Tabla 1). El metabolismo de N y S están vinculados, por lo que deficiencias de S disminuyen la asimilación de N las hojas. Los síntomas de deficiencia son similares a los de N (hojas amarillentas) pero con la diferencia de detectarse en las hojas superiores, en formación o nuevas, y no en las hojas inferiores o viejas. En Argentina, las regiones con mayor frecuencia se describen síntomas de deficiencia en este elemento y respuestas a su fertilización es el centro y el sur de Santa Fe (Martínez y Cordone, 1998). Con menor frecuencia se han presentado respuestas al agregado de S en el centro-norte de Buenos Aires.

Las aplicaciones de fertilizantes con azufre inducen a mayores rendimientos de cultivos de soja en lotes degradados (muchos años de agricultura) y en ausencia de deficiencias de P (Figura 10).

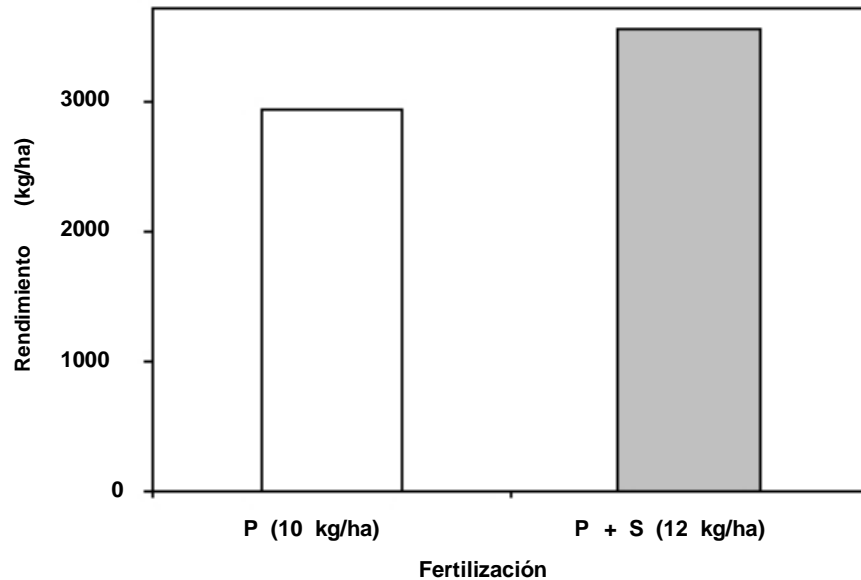


Figura 10. Efecto de la fertilización con azufre sobre la producción de cultivos de soja en la región centro-sur de Santa Fe. Promedio de 6 sitios con niveles de P mayores a 15 ppm (Martínez y Cordone, 2000).

La necesidad de fertilización con S podría determinarse según los análisis de los contenidos de $S-SO_4^-$ en los suelos. Messick (1992) recomienda el agregado de S en lotes con niveles extractables de $S-SO_4^-$ inferiores a 10 ppm o si se han encontrado deficiencias generalizadas en la región. Resultados preliminares del proyecto Fertilizar de INTA muestran que parte de las variaciones en la respuesta al agregado de S serían explicados por diferencias en la capacidad de mineralización de los suelos (Díaz-Zorita y col. 2002). Asimismo, experiencias realizadas por Fontanetto (2004) demostraron que a medida que la capacidad de mineralización de $S-SO_4^-$ del suelo aumenta, las respuestas de la soja de primera al agregado de este nutriente es cada vez menor, sobre todo cuando se

superan los 20 ppm de $S-SO_4^-$ mineralizado (Figura 11).

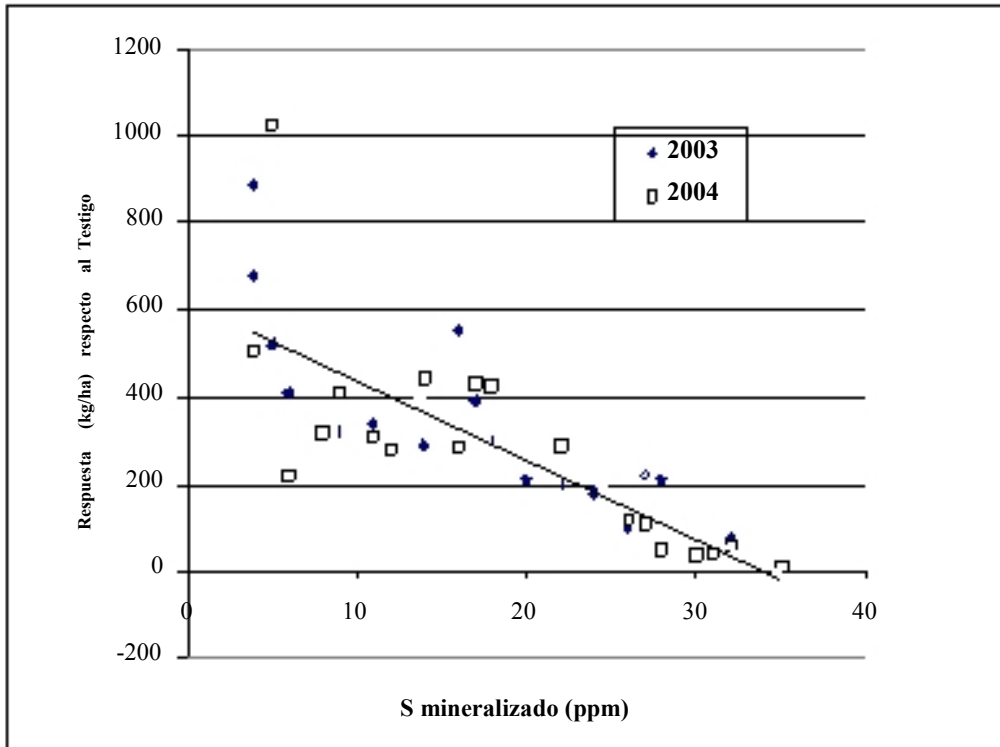


Figura 11. S-SO₄ del suelo mineralizado durante dos campañas agrícolas y respuesta de la soja de primera a la fertilización azufrada. INTA Rafaela (2004).

Varios estudios muestran que tanto el P como el S aplicados en cultivos de trigo tienen efectos residuales de importancia sobre la soja de segunda y cultivos siguientes (Figura 11). En la Figura 12 se presentan los efectos de la fertilización con N, P y S en trigo/soja con dos secuencias de cultivos distintas (trigo/soja: T/S y maíz-trigo/soja: M-T/S).

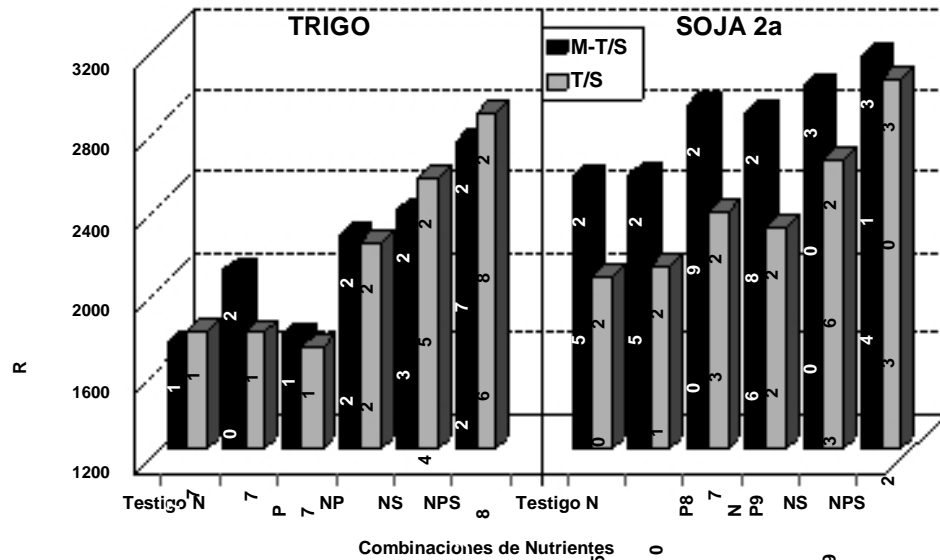


Figura 12. Rendimientos de trigo y soja de 2a. (promedio de 3 campañas agrícolas: 1999/00, 2000/01 y 2001/02 con diferentes dosis de fertilizantes y secuencias de cultivos.

Unidad Demostrativa Agrícola Bernardo de Irigoyen.

En general se detectaron mayores rendimientos del trigo y de la soja en la secuencia M-T/S que en la T/S, por ser la primera de menor consumo de agua y de nutrientes. Para el trigo no fue muy marcado el efecto de la secuencia, pero sí lo fue para el caso de la soja de segunda.

En la Figura 13 se presentan los datos de producción de cuatro cultivos: trigo (1er cultivo), soja de segunda (2do cultivo), soja de primera (3er cultivo) y maíz (cuarto cultivo) con diferentes combinaciones de P y de S y con una dosis de suficiencia de N. Los fertilizantes se aplicaron únicamente al trigo (1er cultivo de la secuencia).

