

Fertilización con fósforo en secuencias continuas de soja

M. Bermúdez¹, M. Díaz-Zorita^{1,2}, G. Espósito³, G. Ferraris⁴, G. Gerster⁵, M. Saks⁶, F. Salvagiotti⁵, y L. Ventimiglia⁷ (Ex aequo)

Introducción

El cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] cubre en la región pampeana el 53% del área cultivable y es de los cultivos de mayor importancia tanto en el sector productivo, exportador e industrial, alcanzando una superficie implantada superior a los 20 millones de hectáreas (SIIA, 2013). Cubiertas las necesidades de nitrógeno (N), mayormente por el proceso de fijación biológica del N₂ atmosférico, el fósforo (P) es el principal nutriente que limita la productividad del cultivo de soja. Se ha determinado que la respuesta aumenta cuando los niveles extractables de P en la capa superficial de los suelos disminuye, estableciéndose como umbral de respuesta valores inferiores a 16 mg kg⁻¹ de P Bray a 0-20 cm (Ferraris et al., 2008). Aproximadamente el 68% del área sembrada recibe fertilización fosfatada con dosis medias de fertilizantes inferiores a la extracción de nutrientes del cultivo (García y González Sanjuan, 2012). Sainz Rosas et al. (2012) mostraron que, en la mayor parte de los suelos de la región pampeana, aproximadamente en 15 227 000 ha, los niveles de P extractable (Bray y Kurtz 1) son inferiores o iguales a 15 mg P kg⁻¹, por lo que la disponibilidad de este elemento limitaría la normal producción de los cultivos en esta área.

En base a lo expuesto, la aplicación de P en cantidades mayores a las actuales, sería adecuada para mantener e incrementar tanto la productividad como los niveles de P extractable en el suelo. Numerosos estudios analizan el comportamiento de soja, en relación con los niveles de P y la fertilización con este elemento, mayormente desarrollados en secuencias con otros cultivos en rotación. Sin embargo, son escasos los estudios que consideran este análisis en sistemas continuos de soja, situación muy frecuente en los planteos productivos en la región pampeana. En general, se observa que la fertilización con P en bandas próximas a la línea de siembra aporta una mayor eficiencia de aprovechamiento del nutriente, pero en dosis limitadas para el cultivo por el riesgo salino de fitotoxicidad en contacto directo entre

fertilizantes y semillas (Ventimiglia y Carta, 2005; Salvagiotti et al., 2013). Las aplicaciones en superficie son una alternativa de manejo de la fertilización con P, tanto por no presentar riesgos sobre la implantación permitiendo aportar mayores dosis del nutriente como por razones logísticas

mejorando la operación de siembra (Echeverría y García, 2005).

La aplicación en la banda de siembra de dosis de P mayores a las frecuentemente utilizadas, resultarían en un aumento en la respuesta en producción de soja. Sin embargo, este aumento de dosis podría reducir la implantación de los cultivos por riesgo de fitotoxicidad y limitar la respuesta en producción. Es así que la corrección con fertilizante aplicado en superficie mostraría mayor consistencia en la respuesta del cultivo dependiendo de su momento de utilización. El objetivo de este trabajo fue cuantificar la producción de grano de soja con distintas estrategias de fertilización fosfatada que incluyen variantes de dosis, momento y localización en sitios representativos de la región pampeana.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló entre las campañas 2010/11 y 2012/13 sobre 5 áreas ubicadas en sitios representativos de la región pampeana con un total de 12 sitios. En cada sitio se establecieron 5 estrategias o tratamientos de manejo de la fertilización con P (**Tabla 1**). Estos tratamientos fueron repetidos en el mismo sitio durante 2 o 3 años según el sitio (**Tabla 2**). Es decir que en cada año, las mismas dosis de P fueron aplicadas sobre la misma parcela en igual época y con la misma localización. Las dosis de fertilizante variaron entre sitios representando en el tratamiento 2 ("dosis base de P"), la dosis "frecuente" de aplicación en cada región y en los tratamientos 3, 4 y 5 ("dosis alta de P") un aporte suficiente para reponer la cantidad extraída por la producción de granos del cultivo (**Tabla 1**). En el tratamiento 5, se aplicó un 70% de la dosis al voleo en invierno y el restante 30% en forma localizada a la siembra. En todos los casos se aplicó P como Superfosfato Triple de Calcio (0-20-0). Los tratamientos se arreglaron en un diseño experimental de bloques completos al azar con 4 repeticiones, contando cada unidad experimental con una superficie que varió de acuerdo a cada sitio experimental entre 12 y 30 m².

Tabla 1. Tratamientos evaluados, dosis, momento y localización del fertilizante con P en el cultivo de soja.

Tratamiento	Descripción	Dosis de P kg ha ⁻¹	Momento de aplicación	Localización
T1	Testigo	-	-	-
T2	Dosis base de P	8-15	Siembra	Localizado
T3	Dosis alta de P	25-29	Invierno	Voleo
T4	Dosis alta de P	25-29	Siembra	Voleo
T5	Dosis alta de P dividida	25-29	Invierno + siembra	Voleo + localizado

¹ Novozymes Bioag S.A. Correo electrónico: mnbz@novozymes.com; ² INBA-CONICET; ³ IUNRC; ⁴ INTA Pergamino; ⁵ INTA Oliveros;

⁶ Bunge Argentina S.A.; ⁷ INTA 9 de Julio.

Tabla 2. Sitios, año de siembra, dosis de P aplicada y análisis de suelo inicial (0 a 20 cm). Pe = P extractable (Bray y Kurtz 1), M.O. = materia orgánica.

Sitios (Provincia)	Siembra			Pe mg kg ⁻¹	Arena	Limo	Arcilla	M.O.	P aplicado, kg ha ⁻¹ *	
	2010	2011	2012						D. base	D. alta
9 de julio (Bs. As.)	Si	Si	Si	10	650	200	150	22	8	28
Ferre (Bs. As.)	Si	Si	Si	14	280	480	230	28	10	25
Aldao (Sta. Fe)	Si	No	No	10	250	727	23	24	15	28
Carcarañá (Sta. Fe)	Si	Si	Si	12	20	740	240	25	15	28
Río cuarto (Cba.)	No	Si	Si	15	320	560	120	18	9	29

* P expresado como P elemental, 10 kg P ha⁻¹ equivalen a 114 kg de SFT ha⁻¹.

Tabla 3. Respuesta en rendimiento de soja al agregado de P y diferencia promedio entre la respuesta a la fertilización en dosis alta y dosis base de P para los 12 sitios evaluados.

Tratamientos	Campaña		
	2010	2011	2012
Fertilizados con P-control	363 a ¹	214 a	378 a
Dosis alta - Dosis base	300 a	491 a	445 a

¹ La ausencia de letras distintas indican la ausencia de diferencias significativas entre campañas ($p > 0.05$).

Tabla 4. Respuesta en rendimiento de soja a la aplicación de P y diferencia entre la dosis alta y la dosis base de P para los doce sitios evaluados en los tres años.

Sitio	Respuesta a la aplicación de P	Diferencia dosis alta vs. dosis base siembra
1	438* ¹	268
2	253	269
3	526*	227
4	550*	848*
5	472*	847*
6	327*	-13
7	175	12
8	230*	61
9	51	113
10	637*	97
11	907*	837*
12	2655*	1046*

¹ Las respuestas y diferencias seguidas con asterisco indican diferencias significativas ($p > 0.05$).

Los cultivos se sembraron con semillas de soja de variedades de alta producción según cada región, inoculadas con *Bradyrhizobium japonicum* para

proveer una adecuada nutrición nitrogenada. Además, en todos los experimentos se aplicó azufre (S) para corregir posibles deficiencias de este nutriente, en dosis que variaron entre 10 y 18 kg de S ha⁻¹ año⁻¹. Los ensayos se mantuvieron libres de plagas, enfermedades y malezas.

En los lugares de estudio, se tomaron muestras compuestas (0-20 cm) en cada sitio experimental, para la caracterización de los suelos. Los suelos donde se realizaron los ensayos son representativos de los lotes agrícolas con contenido de materia orgánica inferior a 28 g kg⁻¹. El contenido de P estuvo en un rango que varió entre 10 y 15 mg kg⁻¹ (Tabla 2).

Al momento de la cosecha se determinó el rendimiento de grano de cada una de las unidades experimentales. Se tomaron muestras de los granos de cada tratamiento para la determinación del contenido de P (espectrometría de emisión atómica por plasma inducido) para calcular el balance aparente de este nutriente. El balance de nutrientes se calculó como la diferencia entre las cantidades de nutrientes aplicadas y removidas de un sistema de producción. La eficiencia en el uso del P (EUP) se calculó como el cociente entre la respuesta a P y la dosis aplicada. Los datos fueron analizados con el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2012), mediante análisis de variancia para cada sitio y para el conjunto de los sitios, se realizaron además pruebas de comparación de medias y análisis de regresión.

Resultados

En las condiciones de este estudio, los rendimientos de soja variaron entre 1501 y 6741 kg ha⁻¹. El análisis en conjunto a través de todos los sitios y años mostró que el rendimiento promedio de soja para los tratamientos sin fertilización de P fue de 3303 kg ha⁻¹ con una respuesta, en promedio para los 4 tratamientos de fertilización en los tres años, de 566 kg ha⁻¹ ($p < 0.05$). Esta respuesta, equivalente a mejoras del 17% en la producción, sustenta la importancia que tiene el agregado de P para alcanzar altos rendimientos del cultivo cuando los niveles extractables son inferiores a 15 mg kg⁻¹. Del mismo modo, se observó que los tratamientos con dosis

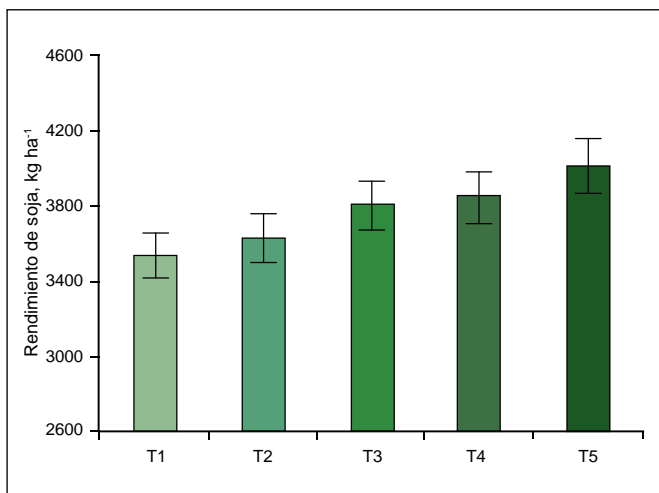


Figura 1. Rendimiento medio del cultivo de soja como resultado de diferentes dosis, momentos y formas de localización de P en 12 sitios y 3 campañas de la región pampeana de Argentina. Medias de tratamientos con distinta letra difieren significativamente entre sí ($p \leq 0.05$). Las barras indican el error estándar.

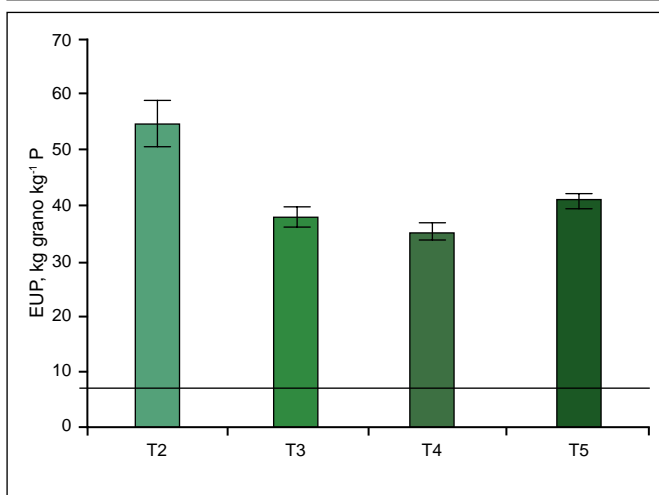


Figura 2. Eficiencia de uso de P (EUP) para los diferentes momentos y dosis de aplicación de P. Promedio de 3 campañas y 12 sitios de experimentación en la región pampeana de Argentina. La línea horizontal continua muestra la relación media de precios históricos entre granos de soja y P del fertilizante fosfato monamónico (Agromercado, 2014). Las barras indican el error estándar.

alta de fertilización con P, aplicados tanto en el invierno como en la siembra, mostraron mayores rendimientos con respecto al tratamiento Testigo (703 kg ha^{-1} , $p \leq 0.05$) o los fertilizados con la dosis base incorporada al sembrar (186 kg ha^{-1} , $p \leq 0.05$). Estos resultados sugieren que los niveles de P aplicados como base a la siembra, definidos según el uso frecuente en cada región estudiada, fueron insuficientes para alcanzar los máximos rendimientos. Por lo tanto, la fertilización con dosis mayores a 8 o $15 \text{ kg de P ha}^{-1}$ permitieron mejorar los rendimientos. Se observó que los aumentos en los rendimientos fueron independientes de la campaña considerada. En las condiciones de estos estudios, tanto la respuesta relativa a la aplicación P como la diferencia

en producción según dosis de fertilización con P fueron indistintas de los años de aplicación (**Tabla 3**).

La fertilización con P, en la combinación de los tratamientos de dosis base y de dosis alta, mejoró los rendimientos de soja en todos los sitios, variando el incremento de producción entre 51 y 2655 kg ha^{-1} (**Tabla 4**). Sin embargo, la información disponible no fue suficiente para determinar factores que discriminen entre sitios con diferente nivel de respuesta media a la fertilización. De los 12 sitios analizados, en 9 de estos (75% de los casos), las respuestas positivas fueron estadísticamente significativas a un nivel de $p \leq 0.05$ (**Tabla 4**). En el análisis para determinar si los incrementos en rendimiento se debieron a los tratamientos con dosis base o de dosis altas, se observó que la respuesta debida al aumento de dosis de fertilización fue de hasta 1046 kg ha^{-1} y en 4 de los 12 sitios (30% de los casos) con diferencias con un nivel de $p \leq 0.05$ entre ambos tratamientos de fertilización. En general, entre los tratamientos con alta dosis de fertilización con P, los mayores incrementos en producción tendieron a observarse cuando la dosis se aplicó fraccionada en superficie anticipada a la siembra y localizada en el momento de la siembra (**Figura 1**).

Con respecto a la localización del P, las diferencias entre tratamientos de fertilización en superficie, localizada en bandas y fraccionada entre ambas formas de aplicación, fueron significativas ($p \leq 0.05$). La información disponible fue insuficiente para describir diferencias en los rendimientos según la aplicación de los tratamientos con dosis alta de P en superficie ("al voleo") entre la siembra y durante el invierno. La estrategia de mejor comportamiento combinó la aplicación anticipada del P con 70% en el invierno, y el restante 30% localizado durante la siembra (**Figura 1**). En promedio, se observaron aumentos en la producción de soja de 186 kg ha^{-1} por incrementar la dosis de P de 0 a 8 o 15 kg P ha^{-1} , y de 368 kg ha^{-1} entre los tratamientos de dosis alta de P completa tanto en el invierno como en la siembra y esta dosis alta de P fraccionada entre superficie y localizada en la siembra.

La fertilización de base con P durante la siembra mostró la mayor eficiencia en el uso del P aplicado (EUP) pero con la mayor variabilidad en su comportamiento (**Figura 2**). Por el contrario, los tratamientos de fertilización con dosis altas de P obtuvieron similares EUP entre sí y una menor variabilidad.

La dosis de P aplicado de base al fertilizar en el momento de la siembra (8 a 15 kg P ha^{-1}) mostró ser insuficiente para reponer la exportación media de P en los granos generando balances aparentes negativos de P (**Figura 3**). Al superarse los $15 \text{ kg de P aplicado ha}^{-1}$, no solo se incrementaron los rendimientos sino que se lograron balances aparente medios del nutriente positivos. El testigo sin fertilizar y el tratamiento que recibió entre 8 y $15 \text{ kg de P ha}^{-1}$ mostraron un balance aparente negativo

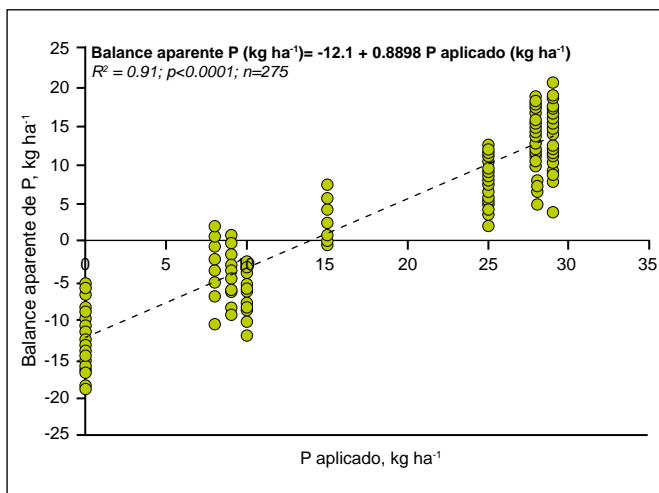


Figura 3. Balance aparente de P según dosis de fertilización con P en 5 sitios representativos de la región pampeana de Argentina y 3 campañas productivas.

Tabla 5. Concentración de P en granos de soja (%) según diferentes dosis y momento de aplicación de P. Promedio de 12 sitios. Entre paréntesis se indica el error estándar de la media.

Tratamiento	P en grano, %
Testigo sin fertilizar	0.39 (±0.010)
P base siembra	0.40 (±0.009)
P alto al voleo	0.42 (±0.006)
P alto fraccionado	0.41 (±0.008)

del P. En cambio, si bien el tratamiento que recibió 15 kg de P ha⁻¹ alcanzó altos rendimientos de soja (3220 kg ha⁻¹), la cantidad aportada de P cubrió la demanda del cultivo alcanzado un balance positivo de 2.8 kg de ha⁻¹. Los tratamientos con la aplicación de entre 25 y 29 kg de P ha⁻¹ mostraron balances positivos de P de entre 7 y 18 kg ha⁻¹.

La concentración de P en grano tendió a ser mejor en los tratamientos fertilizados que en ausencia de esta práctica. En promedio, los contenidos de P en los granos de los tratamientos de fertilización en dosis de base fueron 2.6 % mayores que el control sin fertilizar. La aplicación de altas dosis de fertilización con P, independientemente de la ubicación y momento de fertilización, permitió incrementar en promedio 6.6% la concentración del nutriente en los granos (Tabla 5).

Conclusiones

Los resultados de la evaluación de 12 casos representativos, evaluados en tres años y cinco localidades de la región en suelos con limitaciones en la oferta de P y bajo condiciones continuas de producción de soja, muestran que la aplicación de una dosis de base en el momento de la siembra de entre 8 y 15 kg ha⁻¹ de P, semejante a la práctica de fertilización actual, logra incrementar parcialmente la producción de

granos (186 kg ha⁻¹) y la EUP. Las mayores mejoras en rendimientos se logran con dosis de entre 25 y 29 kg ha⁻¹ de P aplicadas en superficie (“al voleo”) durante el barbecho en el invierno o en pre-siembra de los cultivos o combinando 70% de la dosis en superficie y el resto localizada en el momento de la siembra. En promedio, la fertilización en superficie mostró aumentos de 532 kg ha⁻¹ y 949 kg ha⁻¹ con aplicaciones fraccionadas. Esta última alternativa además de contribuir a incrementar los rendimientos, permitiría desarrollar estrategias de manejo de la fertilización que permitan mejorar los balances aparentes del nutriente al compensar los niveles de exportación de P en los granos.

Agradecimientos

A Fertilizar Asociación Civil por el financiamiento de este estudio.

Bibliografía

- Agromercado. 2014. Síntesis Económica. Revista Agromercado 346 (Febrero 2014), 72 p.
- Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. González., M. Tablada, y C.W. Robledo. 2012. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, F.C.A., Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- Echeverría, H.E., y F.O. García. 2005. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Editorial INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Ferraris, G. 2008. Fertilización de la soja. pp. 261-278. En: R. Melgar y M. Díaz Zorita (eds). Fertilización de cultivos y pasturas, 2^{da} edición ampliada y actualizada. 569 p.
- García, F.O., y M.F. González Sanjuan. 2012. La nutrición de suelos y el balance de nutrientes ¿Cómo estamos?. Fertilizar Asociación Civil. Diciembre 2012, Revista No. 24.
- Sainz Rozas, H.R., H.E. Echeverría, y H. Angelini. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y ExtraPampeana argentina. RIA / Vol. 38:(1):33-39.
- Salvagiotti, F., M. Barraco, D. Dignani, H. Sanchez, A. Bono, P. Vallone, G. Gerster, C. Galarza, J. Montoya, y V.J. Gudelj. 2013 Plant stand, nodulation and seed yield in soybean as affected by phosphate fertilizer placement, source and application method. European Journal of Agronomy 51:25-33.
- SIIA, Sistema Integrado de Información Agropecuaria. 2013 Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. <http://www.siia.gov.ar>, consultado en Marzo 13.
- Ventimiglia, L.A., y H.G. Carta. 2005. Soja: Efecto de los fertilizantes aplicados en la línea de siembra sobre el número de plantas y el rendimiento. Informaciones Agronómicas 28:23-28. ❖