XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo
II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas"
Producción sustentable en ambientes frágiles
Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014

FERTILIZACION CON FOSFORO EN SECUENCIAS CONTINUAS DE SOJA

Bermúdez, M.[1*]; Díaz-Zorita, M.[1,2]; Espósito, G.[3]; Ferraris, G.[4]; Gerster, G.[6]; Saks, M.[5]; Salvagiotti,F.[6]; Ventimiglia, L.[7] (Ex aequo)

[1]Novozymes Bioag S.A.; [2]INBA-CONICET; [3]UNRC; [4]INTA Pergamino, [5]Bunge Argentina S.A; [6]INTA Oliveros; [7]INTA 9 de Julio
***mnbz@novozymes.com, Calle 10 y Calle 11; 1629, P.I. Pilar, Buenos Aires, Argentina, +54 230 4496100**

INTRODUCCIÓN

El cultivo de soja (G*lycine 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 como 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 N desde el aire, 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 de la capa superficial de los suelos disminuye, estableciéndose como umbral de respuesta valores inferiores a 16 ppm (Ferraris et al., 2008). El área fertilizada mayormente con fuente fosfatada, alcanza el 68 % de la superficie sembrada 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 Kurtz 1) son inferiores o iguales a 15 mg 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 permitirían cubrir los requerimientos de extracción 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 según la dosis y el momento de la fertilización fosfatada en sitios representativos de la región pampeana.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se desarrolló entre las campañas 2010/11 y 2012/13 sobre 5 áreas ubicadas en sitios representativos de la región pampeana totalizando un total de 12 sitios. En cada sitio se establecieron 5 tratamientos de manejo de la fertilización con P. Estos tratamientos fueron repetidos en el mismo sitio durante 2 o 3 años según el sitio (Tabla 2). Es decir en cada año las dosis de P fueron aplicadas sobre la misma parcela. 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 el mantenimiento de la cantidad extraída por la producción de granos del cultivo (Tabla 1). En todos los casos se aplicó Superfosfato Triple de Calcio (0-46-0). 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 m^2.

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 a 15	Siembra	Localizado
T3	Dosis alta de P	25 a 29	Invierno	Voleo
T4	Dosis alta de P	25 a 29	Siembra	Voleo
T5	Dosis alta de P dividida	25 a 29	Invierno + siembra	Voleo + localizado

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 (0-20cm) en cada sitio experimental, para la caracterización de los suelos. 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, pruebas de comparación de medias y análisis de regresión.

RESULTADOS

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).

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

Sitios	Siembra			Pe	Arena	Limo	Arcilla	M.O.	Paplicado (kg ha^{-1})	
(provincia)	2010	2011	2012	mg kg^{-1}	g kg^{-1}				base	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
Rio Cuarto (Cba.)	No	Si	Si	15	320	560	120	18	9	29

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 un respuesta, en promedio para los 4 tratamientos de fertilización, de 566 kg ha^{-1} ($p<0,05$). Esta respuesta, equivalente a mejoras del 17% en la producción, sustentando 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 alta de fertilización con P, aplicados tanto en el invierno como en la siembra, mostraron mayores rendimientos con respecto al tratamiento sin fertilizar (703 kg ha^{-1}, $p\leq0,05$) o fertilizados con la dosis base incorporada al sembrar (186 kg ha^{-1}, $p\leq0,05$). 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 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).

Tabla 3. Respuesta en rendimiento de soja al agregado de P y diferencias entre la respuesta a la fertilización en dosis alta y dosis base de P para los 12 sitios evaluados. La ausencia de letras distintas indican la ausencia de diferencias significativas entre campañas ($P\leq 0,05$).

	Campaña		
Respuesta (kg ha^{-1})	2010	2011	2012
Fertilizados con P - control	363 a	214 a	378 a
Dosis alta – Dosis base	300 a	491 a	445 a

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}. Sin embargo, la información disponible no fue suficiente explicar 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 $p\leq0,05$. En el análisis para determinar si los incrementos en rendimiento se debieron a los tratamientos en 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≤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 corrección, fueron significativas (p≤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.

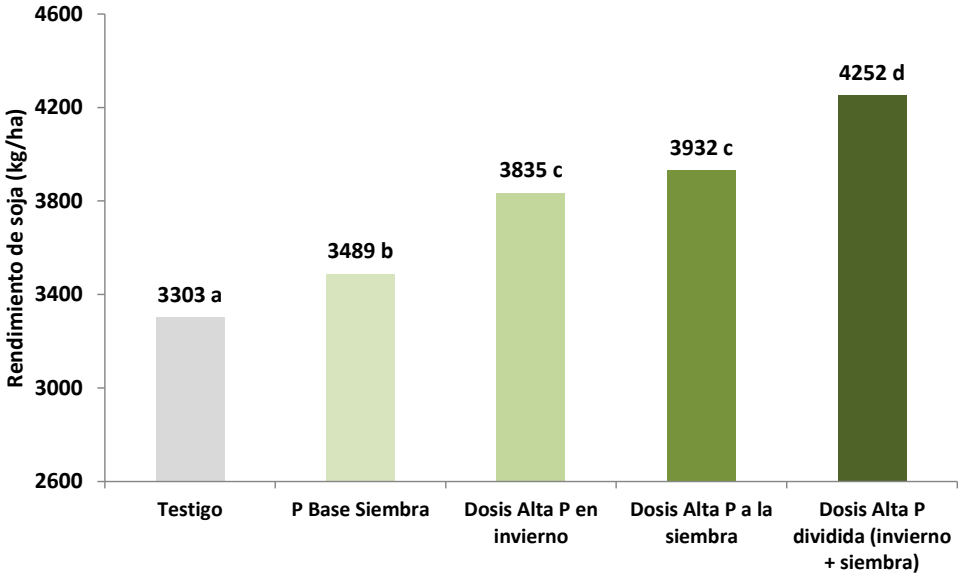

Figura 1. Rendimiento medio del cultivo de soja como resultado de diferentes dosis, momentos y formas de localización de P en 12 sitios y 3 campañas de la región pampeana de Argentina. Medias de tratamientos con distinta letra difieren entre sí (P≤ 0,05).

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 menor variabilidad.

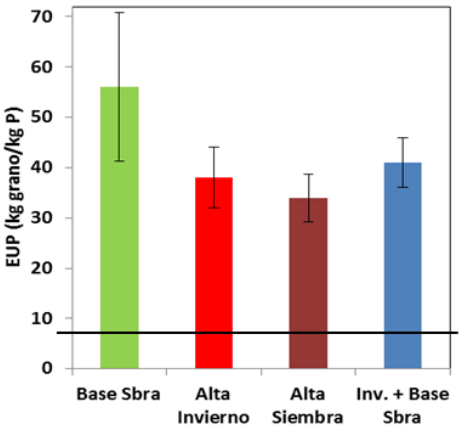

Figura 2. Eficiencia de uso de P (EUP) para los diferentes momentos y dosis de aplicación de P. Promedio de 3 campañas y 12 sitios de experimentación en la región pampeana de Argentina. La línea horizontal continua muestra la relación media de precios históricos entre granos de soja y P del fertilizante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

En las condiciones de este estudio, los rendimientos de soja variaron entre 1501 y 6741 kg ha^{-1} y 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 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 kg de P ha^{-1} mostraron un balance aparente negativo 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 balance positivos de P de entre 7 y 18 kg ha^{-1}.

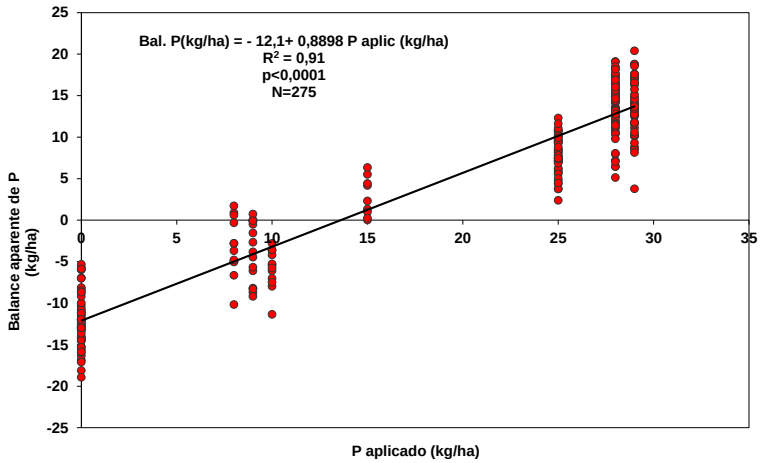

Figura 3. Balance aparente de P según dosis de fertilización con P en 5 sitios representativos de la región pampeana de Argentina y 3 campañas productivas.

La calidad nutricional de los granos de soja producidos, evaluada en términos de la concentración de P 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 4).

Tabla 4. 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)

CONCLUSIONES

Los resultados de la evaluación de 12 casos representativos 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}). Las mayores mejoras en rendimientos se logran con dosis de entre 25 y 29 $kgha^{-1}$ 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 580 $kgha^{-1}$ y 949 $kgha^{-1}$ 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

Fertilizar Asociación Civil por el financiamiento de este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

Agromercado. 2014. Sintesis Economica. Revista Agromercado 346 (Febrero 2014), 72 pp.

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. 2012. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL http://www.infostat.com.ar

Echeverría H. y F. García (ed.). 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, 2da edición ampliada y actualizada. 569 pp.

García y González Sanjuan. 2012. La nutrición de suelos y el balance de nutrientes ¿Cómo estamos?. Fertilizar Asociación Civil. Diciembre 2012, Revista N°24.

Sainz Rozas, H.; H. Echeverría; H. Angelini. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y ExtraPampeana argentina. RIA / Vol. 38 / N.º 1. *pp 33-39*

Salvagiotti F, Barraco M, Dignani D, Sanchez H, Bono A, Vallone P, Gerster G, Galarza C, Montoya J, Gudelj V J 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 el 01/03/13.

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 N° 28, Diciembre 2005, 23-28.