



FERTILIZACIÓN FOSFORADA EN CULTIVOS EXTENSIVOS

CRITERIOS DE DIAGNÓSTICO Y HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PARA SU MANEJO EN EL NORTE –CENTRO-OESTE DE BUENOS AIRES Y SUR DE SANTA FE

* Ing Agr (MSc) Gustavo N. Ferraris
nferraris@pergamino.inta.gov.ar

Resumen

Se discuten experiencias de fertilización fosforada en la región centro-norte y oeste de Buenos Aires y Sur de Santa Fe, en diferentes cultivos. En ellas, el análisis de fósforo en suelo fue un indicador válido para identificar situaciones de deficiencia, estando relacionado a la vez con la magnitud de respuesta a la fertilización y la dosis óptima económica. Sin embargo, en planteos de mediano plazo, las estrategias basadas en mantenimiento y/o reconstrucción del nutriente consiguen incrementar los rendimientos, el nivel de P en suelo y la rentabilidad de una secuencia de cultivos. Surgen como alternativa el empleo de aplicaciones en cobertura, nuevas fuentes y formas químicas de este elemento, así como el creciente uso de abonos orgánicos. Estos son una herramienta valiosa para mejorar diversos parámetros físicos y químicos, e incrementar los rendimientos como complemento de fuentes tradicionales.

Palabras claves:

Fósforo, suficiencia, reconstrucción / mantenimiento, localización.

Introducción

El fósforo (P) es uno de los 17 nutrientes considerados esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Marschner, 1995). Junto con el nitrógeno (N), potasio (K), azufre (S), calcio (Ca) y magnesio (Mg) conforman el grupo de macronutrientes por las cantidades requeridas y la frecuencia con que se encuentran en cantidades deficientes para los cultivos (Tabla 1).

Tabla 1: Requerimientos e índice de cosecha de P de diferentes especies cultivadas en la región pampeana Argentina. Adaptado de Ciampitti y García, 2007.

Nutriente	Cultivos							
	Trigo	Cebada	Maíz	Sorgo	Colza	Soja	Girasol	Maní
kg grano/ kgP	5,0	4,0	4,0	4,4	15,0	7,0	11,0	7,0
Índice cosecha	0,80	0,75	0,76	0,82	0,73	0,88	0,62	0,50

* La extracción está expresada en base a la humedad base de comercialización (HC) de cada cultivo.

El P forma parte de enzimas, ácidos nucleicos y proteínas, y está involucrado en prácticamente todos los procesos de transferencia de energía. Entre las principales funciones de P en las plantas se indican (Marschner, 1995):

1. Transferencia y almacenaje de energía: Los fosfatos son constituyentes del ATP y otros esteres fosfatados que son intermediarios en vías metabólicas de síntesis y degradación.
2. Constituyente de ácidos nucleicos ADN y ARN, por lo tanto involucrado en la transferencia de características genéticas.

3. Constituyente de fosfolípidos de membranas celulares.
4. Transporte y absorción de nutrientes.

Las deficiencias de P afectan en mayor medida el crecimiento que la fotosíntesis (Mollier y Pellerin, 1999). Las plantas con deficiencias de P presentan menor expansión y área foliar y un menor número de hojas (Mollier y Pellerin, 1999). En contraste, los contenidos de proteína y clorofila por unidad de área foliar son poco afectados por deficiencias de P (Plénet et al., 2000). El mayor efecto sobre el crecimiento foliar que sobre el contenido de clorofila explica los colores verdes más oscuros observados en plantas deficientes en P. La nodulación se ve también afectada en leguminosas cultivadas en suelos pobres en P debido a la alta demanda de P de los nódulos (Cassman et al., 1980).

Tradicionalmente, los estudios sobre fertilización fosforada se han centrado en la calibración de umbrales críticos de respuesta tomando como base el método de Bray y Kurtz I, y en la elaboración de curvas de respuesta (Berardo y Grattone, 2000) los cuales deben ser periódicamente actualizadas dados los adelantos permanentes en la aplicación de tecnología y el nivel de rendimiento alcanzado (García et al., 2006). En los últimos tiempos, se ha avanzado además en aspectos tecnológicos de manejo de fertilizantes, basados en procesos como la aplicación en superficie, el desarrollo de fuentes alternativas a las tradicionales o el uso de abonos orgánicos como subproducto de la agroindustria (Ferraris et al., 2010).

El objetivo de este trabajo es revisar los conocimientos actuales sobre fertilización fosforada y brindar recomendaciones para su manejo en cultivos extensivos, sobre la base experiencias realizadas en siembra directa en la región centro-norte de Buenos Aires.

Criterios actuales para el manejo de la fertilización fosforada

El P se caracteriza por su baja movilidad en el suelo y baja eficiencia de absorción por los vegetales y, como contrapartida, elevada residualidad hacia los cultivos subsiguientes. Esta característica hace que su manejo pueda realizarse con dos enfoques, 1. Criterio de **suficiencia**: el cual implica fertilizar sólo cuando la eficiencia de uso de P (EUP) esperada es mayor a la relación de precios y, en ese caso, aplicar la dosis óptima económica (DOE) que surge de igualar el ingreso marginal con el costo marginal del fertilizante y 2. Criterio de **reconstrucción y mantenimiento**, que considera mantener o reconstruir los niveles del nutriente en el suelo, y propone dosis que por lo común permiten obtener el rendimiento máximo. El primero de estos criterios sugiere dosis menores y un mayor retorno a la inversión en fertilizante, y por lo tanto es el más comúnmente utilizado. Sin embargo, cuando el nivel inicial de P es muy bajo, la DOE se asemeja a la de reposición.

Trigo

En un grupo de ensayos realizados en el norte de Buenos Aires, El cultivo de trigo respondió incrementando significativamente sus rendimientos por el agregado de P en cinco de nueve ensayos (Ferraris et al, 2010). La respuesta a la fertilización estuvo fuertemente asociada a la disponibilidad inicial de P y poco asociada al rendimiento del cultivo o la magnitud de las precipitaciones, lo cual lo distingue de otros nutrientes de alta movilidad (Gutierrez Boem y Thomas, 1998). Se estableció un umbral crítico de 16 ppm, debajo del cual es esperable una reducción de al menos el 5 % en ausencia de fertilización (Figura 1.a). El máximo rendimiento se alcanzó con la dosis de 20 kgP ha⁻¹, siendo las eficiencias observadas de 33,7, 21,1 y 11,7 kg trigo kg P⁻¹ para la dosis de 10, 20 y 30 kg Pha⁻¹, respectivamente. Sin embargo, la dosis que maximiza el rendimiento varía según el nivel inicial del nutriente (Figura 1.b). Esto confirma la validez del análisis de P-Bray como predictor de la respuesta a la fertilización fosforada. En la región bajo estudio, la importancia del análisis se ve incrementada por el escaso aporte de P proveniente de la mineralización de la materia orgánica, lo que hace al P intercambiable mineral, medido por Bray I, la principal vía de aporte al sistema.

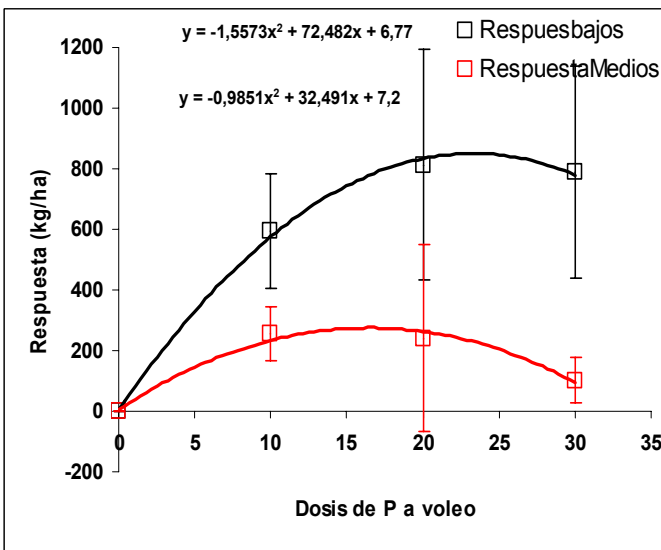
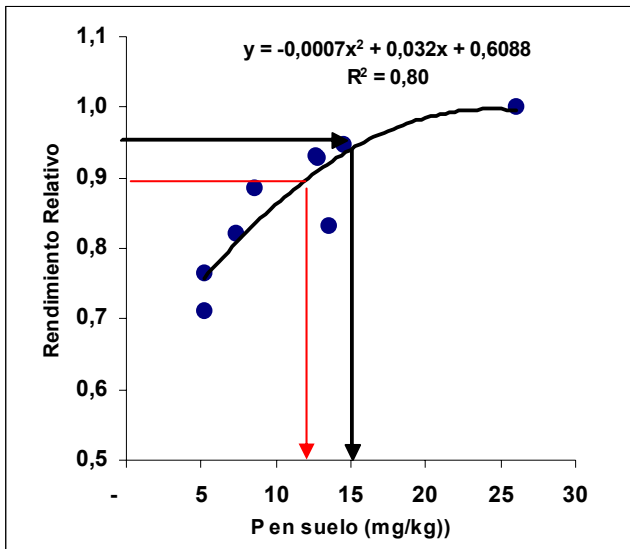


Figura 1: Esquema de fertilización basado en el criterio de suficiencia en trigo: a) Relación entre Rendimiento relativo del testigo en comparación a la media de los tratamientos fertilizados y el nivel de P Bray en trigo b) Función de respuesta según deficiencia severa (<11,6 ppm, línea superior) o moderada (>11,6 ppm, línea inferior) . Ensayos del norte, centro y oeste de Buenos Aires. Años 2008 y 2009.

Aún en un cultivo de invierno bajo restricción de precipitaciones, la aplicación de P al voleo incrementó los rendimientos. Sólo en dos de trece localidades la localización en banda superó al voleo (Figura 2), alcanzando en promedio un diferencial de 140 kg ha⁻¹, aunque no modificó la tendencia general de similar respuesta. Los rendimientos de los tratamientos localizados y al voleo se agruparon en torno a una relación 1:1 (Ferraris et al., 2010).

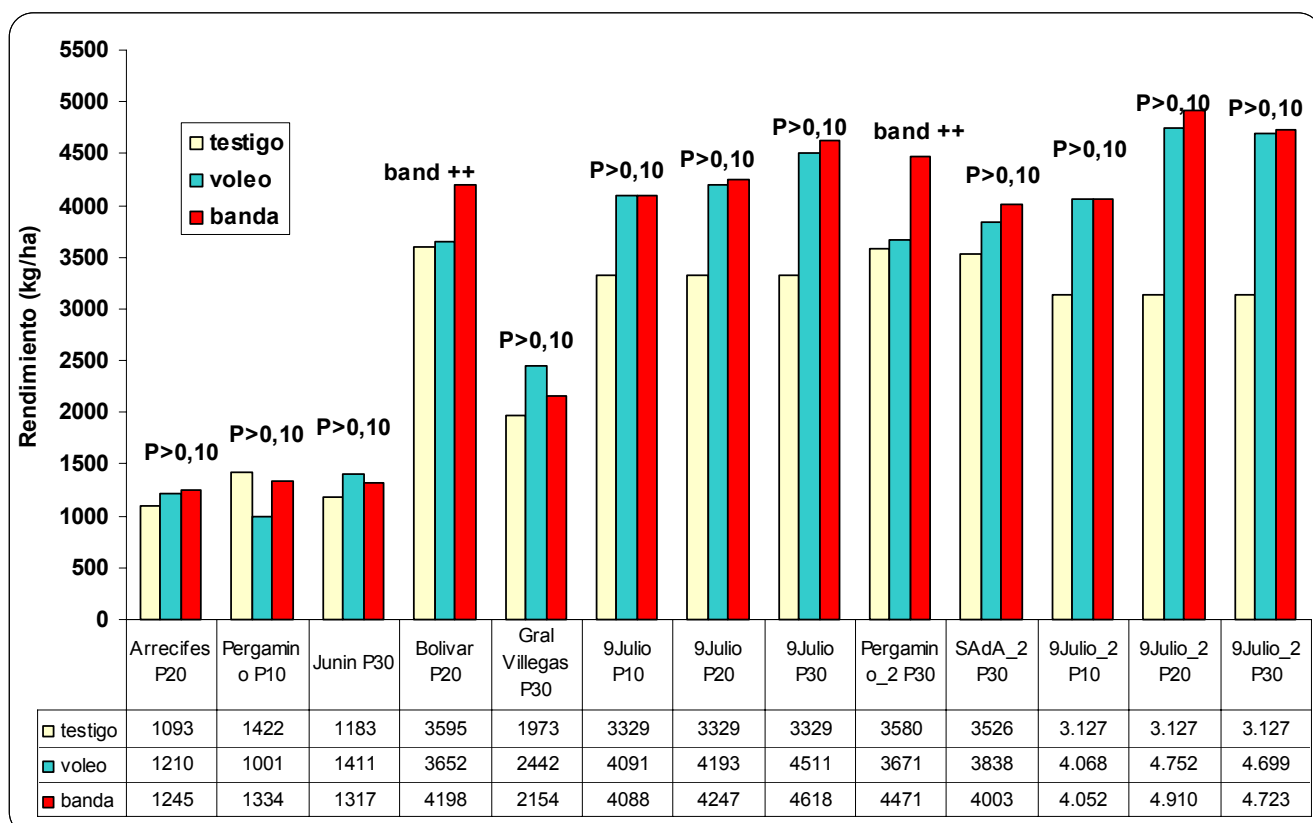


Figura 2: Producción de grano de diferentes formas de localización de fósforo en trigo, producto de diferentes combinaciones de sitio-dosis. Los signos positivos indican diferencias significativas por contraste entre tratamientos de voleo y banda ($P < 0,05$). Años 2008 y 2009.

Maíz

La información generada acerca de los umbrales críticos de respuesta en maíz es un tanto contradictoria. Por lo general, estos se ubican en niveles intermedios entre valores más altos postulados para cereales de invierno, y otros más bajos adjudicados a soja y girasol. Sin embargo, algunos trabajos indican valores similares a los cereales invernales, mientras que otros los asocian a los del resto de los cultivos estivales (Gutiérrez Boem et al., 2010). Una red de 18 ensayos que abarcó la región sur de Santa Fe y centro norte de Buenos Aires no consiguió describir una función de respuesta, pero se pueden separar dos poblaciones con un 78 % de casos en el cuadrante esperado utilizando un umbral crítico de 12 ppm (Prystupa et al., 2006)(Figura 3). Un grupo de 21 ensayos que abarcó la región centro-norte y oeste de Buenos Aires, determinó respuesta incrementos por el uso de P en el orden del 10 % (Ferraris et al., 2008). No se pudo relacionar la respuesta a la fertilización con el nivel del nutriente en el suelo, y esto se atribuye a que estos ensayos, realizados en campos de productores, solo consiguieron explorar ambientes deficientes en P, sin las situaciones siempre necesarias de experimentos sin respuesta para el ajuste de poblaciones de datos. En esta situación, ambientes con deficiencia severa ($< 10 \text{ mg kg P Bray}$) o moderada de P ($> 10 \text{ mg kg} < 15 \text{ mg kg P Bray}$) expresaron similar respuesta a la fertilización (Figura 4). El comportamiento de los tratamientos fertilizados o al voleo fue similar, alineándose en torno a una bisectriz 1:1 (Figura 5).

Las carencias de P afectan el crecimiento del maíz a partir de una menor eficiencia de conversión de la radiación capturada, dado que la completa intercepción suele estar asegurada durante el período crítico alrededor de floración, especialmente en siembras en hileras de 0,52 cm. En experimentos conducidos en Pergamino, especies de menor porte como el maíz pisingallo o pop corn expresaron comparativamente mayor respuesta a la fertilización fosforada, ya que esta permitió mejorar también la cobertura e intercepción de radiación, además de su eficiencia de transformación en biomasa (Ferraris et al, inédito).

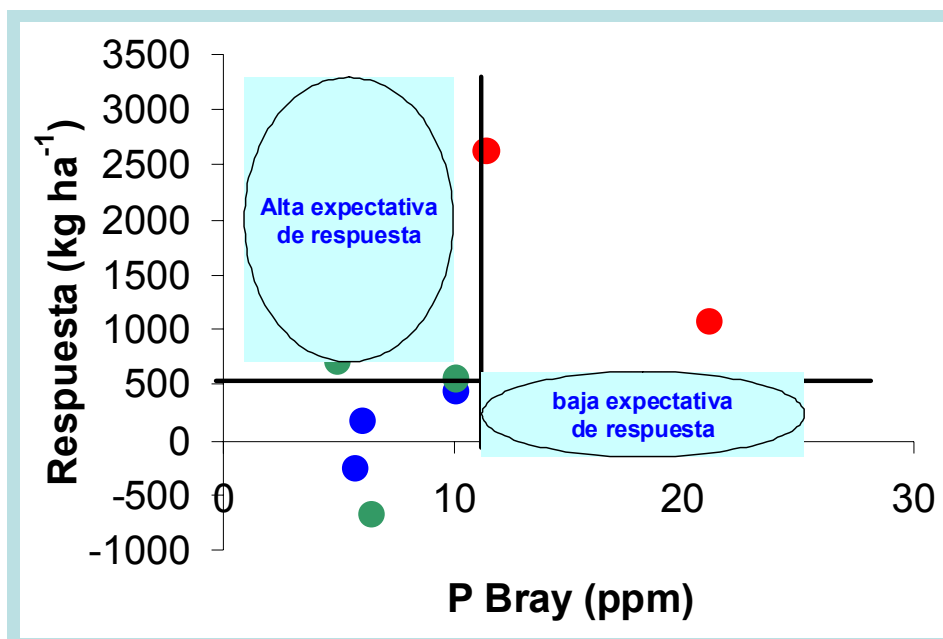


Figura 1: Respuesta a la fertilización fosforada en 18 experimentos del norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe. Los puntos rojos corresponden al 2003/4, los azules al 2004/5 y los verdes al 2005/6. Adaptado de Prystupa et al, 2006.

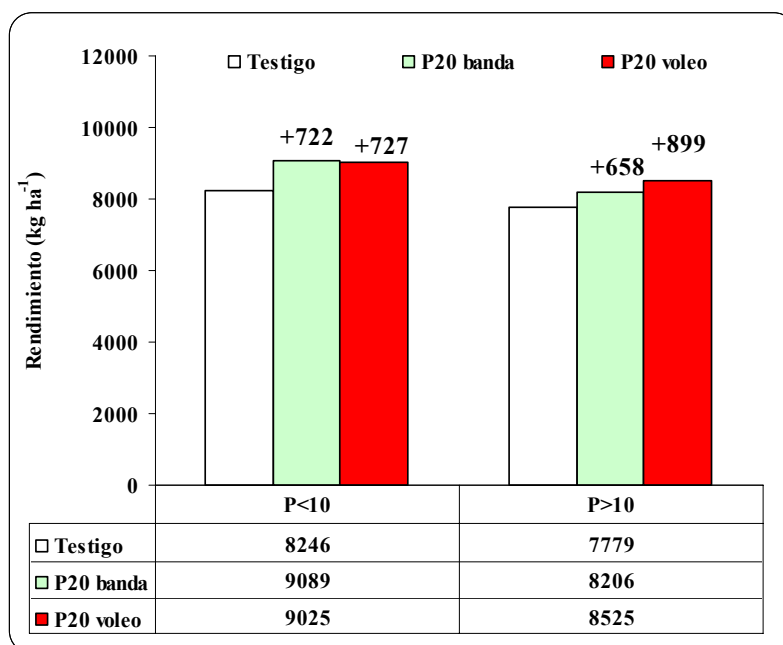


Figura 4: Producción de maíz en 21 experimentos de fertilización fosforada del norte-centro-oeste de Buenos Aires, agrupados según expresaran deficiencias severas (<10) o moderadas (>10<15) del nutriente. Ferraris et al., 2008.

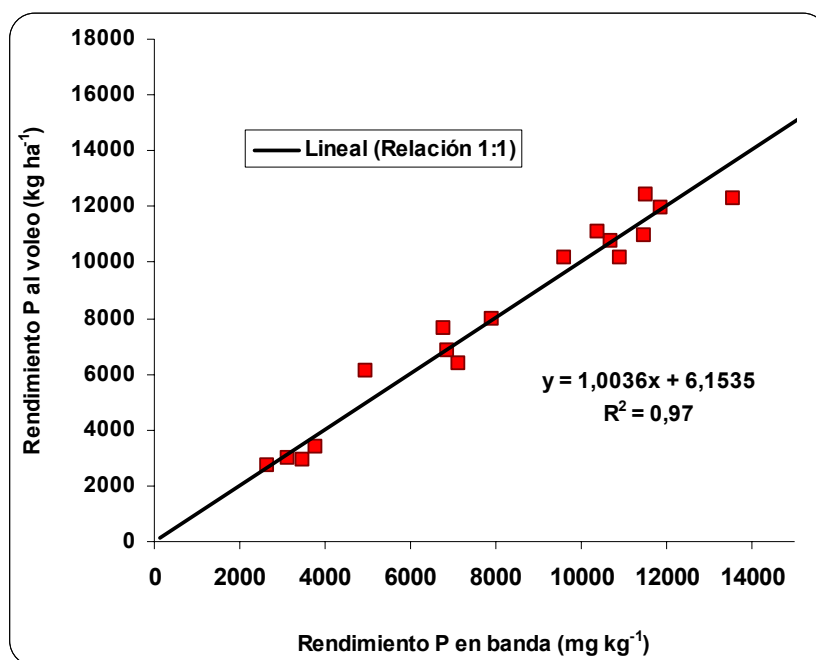


Figura 5: Relación entre el rendimiento de tratamientos de fertilización fosforada al voleo y en banda en maíz. 21 experimentos de fertilización fosforada del norte-centro-oeste de Buenos Aires. Ferraris et al., 2009.

Soja

De los cultivos sembrados en Región Pampeana, la soja es quizás el que presenta menor respuesta a la fertilización fosforada, a la vez de un umbral crítico más bajo. Sin embargo, luego del N el P es el nutriente más determinante de la producción en esta especie, a través de efectos directos sobre la tasa de crecimiento del cultivo, e indirectos sobre procesos asociados, como la fijación biológica de nitrógeno (Ferraris y Mouselgne, 2010) (Figura 6). Como en otras especies, la determinación de su concentración en el suelo mediante análisis químico es una herramienta útil para predecir la expectativa de respuesta a la fertilización (Ferraris, 2008, Ferraris y Mouselgne, 2009)(Figura 7). Esta particularidad permite caracterizar regionalmente las necesidades de fertilización. Así, en una red de ensayos que evaluó regionalmente la interacción genotipo por fertilización en el centro-norte y oeste de Buenos Aires durante las dos últimas campañas, la respuesta a P fue de mayor magnitud en el norte de la región, mientras que hacia el centro y oeste prevaleció en azufre (S) (Ferraris y Mouselgne, 2009).

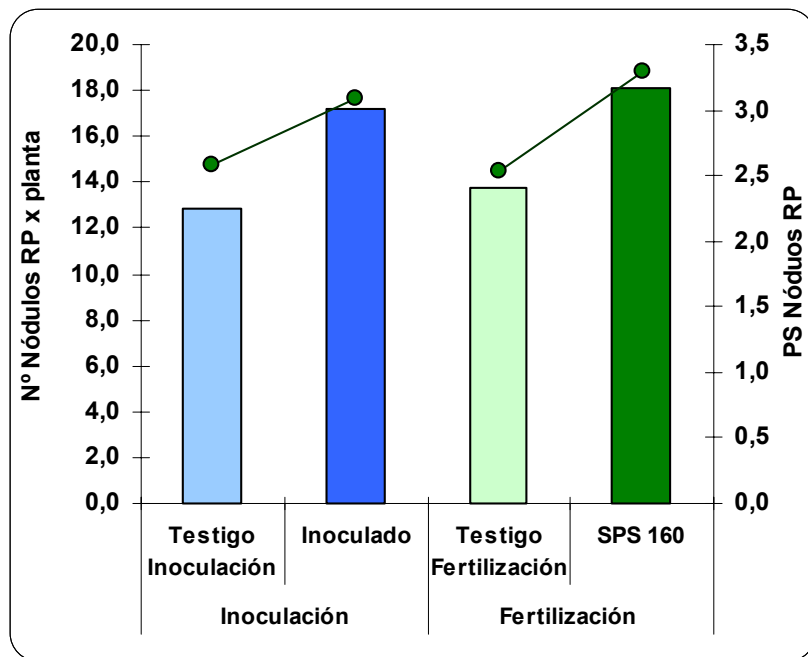


Figura 6: Número (Columna) y Peso seco (líneas) de nódulos en raíz principal de plantas de soja, promedio de 46 ensayos que combinaron fertilización fósforo-azufrada e inoculación con *Bradyrhizobium japonicum* en el norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe. (Ferraris y Mousegne, 2010).

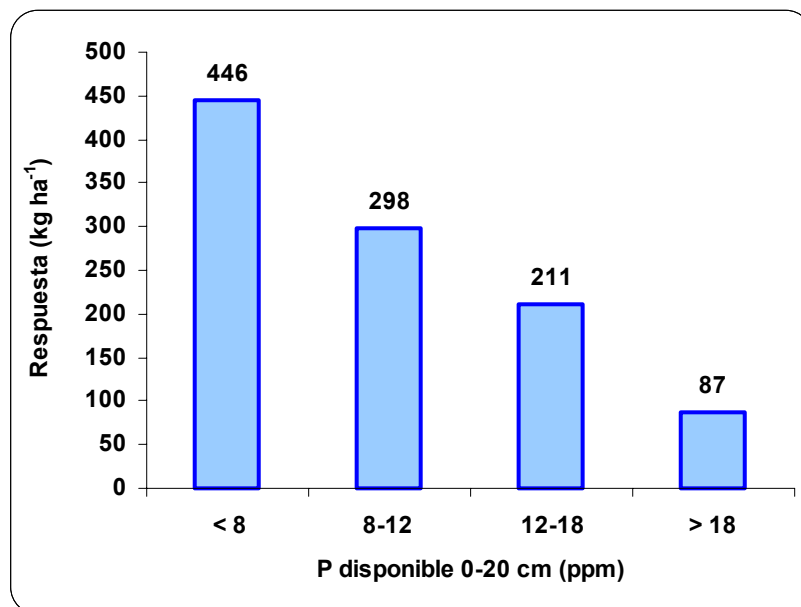


Figura 7: Respuesta media a la fertilización fosforada en soja, según el nivel inicial en el suelo. 29 sitios del norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe, entre los años 2002 y 2009. (Ferraris y Mousegne, 2009).

Estrategias de Suficiencia, Mantenimiento y Reconstrucción. Efectos de mediano plazo.

Los experimentos de larga duración brindan información relevante sobre el efecto acumulativo de estrategias de fertilización basadas en criterios o filosofías de suficiencia o reposición/reconstrucción. En un ensayo actualmente en curso en la localidad de Arribeños, General Arenales, sobre un suelo Hapludol típico, se evaluaron cinco estrategias de fertilización creciente en cuanto a dosis de nitrógeno, fósforo y azufre aplicado al voleo a la siembra (Ferraris et al., 2008). Criterios de suficiencia, reposición o reconstrucción de fósforo generaron diferencias en los rendimientos acumulados y cambios en la disponibilidad de P en el suelo (Figura 8.a), los cuales se correlacionaron con su nivel final. Luego de tres años de ensayo, la disponibilidad de P varió en 1 mg kg⁻¹ por cada 11,9 kgP ha⁻¹ de diferencia entre aplicado y extraído, respectivamente (Figura 8.b). Aún cuando las diferencias en la cantidad de fertilizante aplicado fueron sustancialmente mayores, las

estrategias con mayor aporte de nutriente fueron las más rentables, gracias al incremento de rendimiento conseguido (Ferraris et al., 2008).

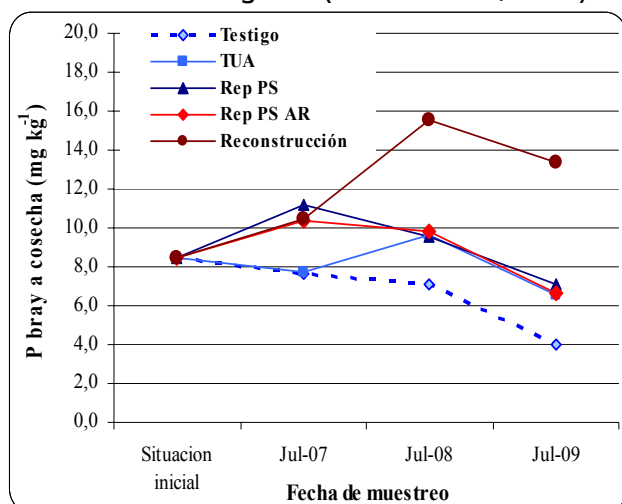


Figura 8.a

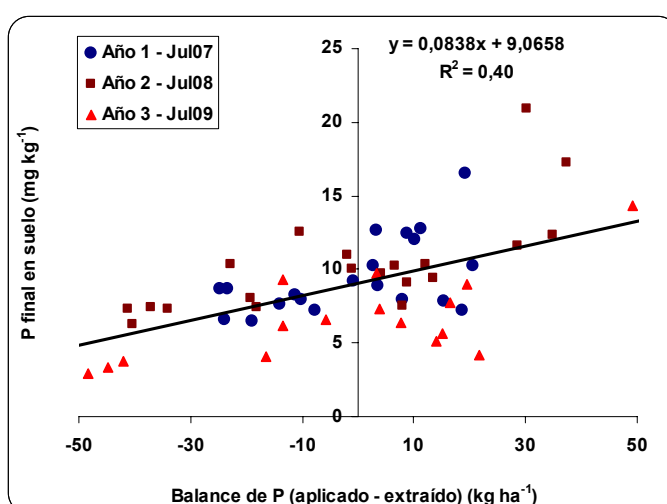


Figura 8.b

Figura 8. a) Evolución de los niveles de P en suelo por tratamiento (mg kg^{-1} , 0-20 cm) y b) su relación con el balance de P (aplicado-extraído en kg ha^{-1}) utilizando los valores provenientes de cada parcela, luego de tres campañas.

Fuentes, momentos y localización de P, pueden mejorar su eficiencia fisiológica ($\text{kg absorbido/kg aplicado}$)?.

Las plantas recuperan el P con baja eficiencia y eso es resultado de las características propias del nutriente, el cual tiende a reaccionar con los coloides del suelo dando lugar a procesos de adsorción y fijación. Con el objetivo de mejorar su recuperación por parte de los cultivos, se están ensayando fuentes que proveen P en forma de polifosfatos, fertilizantes líquidos y aditivos acomplejantes del ión fosfato. De manera general, su comportamiento es satisfactorio siempre que el cambio de fuente no implique una reducción en la dosis de elemento aportado, haciendo más deficitario su balance (Ferraris et al., 2010).

Una fuente poco explotada en cultivos extensivos en relación a su enorme potencialidad lo constituyen los abonos orgánicos, provenientes de la transformación de los granos en productos agroindustriales de origen aviar, porcino o bovino. La mayoría de los planteos que efectivamente alcanzan la reposición de nutrientes incluyen alguno de estos abonos, lo cual además de incrementar los rendimientos y dar un destino productivo a residuos con potencial contaminante, permite mejorar notablemente diversos parámetros físicos y químicos dentro de los cuales el aporte de P y su consecuente evolución en el suelo es uno de los más trascendentes (Tabla 2). Frecuentemente, los abonos orgánicos deben ser complementados con fertilizantes solubles, dado que buena parte de los nutrientes son aportados bajo formas orgánicas de lenta disponibilidad, actuando de esta manera como restauradores de un apropiado balance de nutrientes. Esto alcanza no sólo al P, sino también a otros elementos con efecto residual como potasio, calcio, magnesio o microelementos con carga positiva i.e. zinc y cobre. Las cantidades aplicadas de guano no deben ser excesivas en el tiempo, dados los riesgos de salinización y/o sodificación de los suelos abonados.

Tabla 2: Parámetros físico-químicos de suelo y productividad de cultivos bajo tres situaciones de producción: a) lotes con agricultura continua de más de 50 años con labranza convencional hasta hace 10 años, predominio actual de soja b) lotes con historia 10-20 años bajo siembra continua y rotación soja-trigo/soja-maíz y c) idem b, con aportes de guano a razón de 3,5 ton ha año⁻¹. Los resultados abarcan 20 lotes de producción evaluados de manera continua entre los años 2002 y 2010, sobre suelos Argiudoles típicos Serie Hughes, del norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe.

		A) Larga historia agrícola	B) Moderada historia agrícola, SD y rotación	C) Moderada historia agrícola, SD y rotación y guano	Porcentaje de mejora (C vs A)	Porcentaje de mejora (C vs B)
Infiltración (cm/h)		7,04	7,80	9,01	28,0	15,5
P Bray (mg kg ⁻¹)		10,0	34,3	48,0	382,0	40,0
MO (%)		3,0	3,5	3,4	14,4	0,1
pH		5,8	5,8	6,1	6,1	4,6
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Trigo	4505	4741*	4235**	-6,0	-10,7
	Maíz	10290	11463	11822	14,9	3,1
	Soja	4283	4613	4962	15,8	7,6

Daños de heladas durante los años 2008 y 2009, con afectación de rendimientos en forma moderada (*) o severa (**) a causa de la mayor cobertura del suelo.

Conclusiones

El fósforo es un nutriente esencial con efecto sobre los rendimientos de todos los cultivos extensivos. Si bien se han ajustado variantes tecnológicas para maximizar el beneficio económico por fertilizar con este nutriente, queda claro que un manejo sustentable que considere lograr estabilidad en los rendimientos, requiere un doble abordaje, que considere no sólo la productividad actual de los cultivos sino también su dinámica y evolución en los suelos. Esto implica que los resultados de un manejo nutricional deben calificarse a través del seguimiento de un proceso a lo largo del tiempo, monitoreando suelo, rendimiento y costos económicos y ambientales, más que la medición exhaustiva de una situación puntual.

Bibliografía

BERARDO, A. y F. GRATTONI. 2000. Fertilización fosfatada requerida para alcanzar niveles objetivos de P-Bray en un argiudol. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, AACs. Mar del Plata, Bs. As., Argentina.

CASSMAN, K.G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National*.

CIAMPITTI, I.A. y F.O. GARCIA. 2007. Requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. *Informaciones Agronómicas* N° 33, *Archivo Agronómico* N° 11. IPNI Cono Sur. Acassuso, Bs.As., Argentina.

FERRARIS, G. F. MOUSEGNE Y COLABORADORES. 2008. Efecto aditivo del agregado de diferentes nutrientes en maíz en el norte, centro y oeste de la provincia de Buenos Aires. En: IV Jornada de Maíz INTA EEA Pergamino-AIANBA. 14 pp.

FERRARIS, G. 2008. Fertilización del cultivo de Soja. pp 261-278. En: Fertilización de Cultivos y Pasturas. 2da ed. R. Melgar y M.D. Zorita (eds).

FERRARIS, G. y F. MOUSEGNE. 2009. Comportamiento de grupos de maduración y estrategias de fertilización en soja según ambiente productivo. Campaña 2008/09. *Revista Agromercado*. ISSN 1515-223x. Cuadernillo Soja Vol 28, N 153. pp 12-16.

FERRARIS, G. y F. MOUSEGNE. 2010. Inoculación de Soja en el Norte, Centro y Oeste de Buenos Aires. Resultados de experiencias y prácticas de manejo para mejorar su eficiencia. En: Peticari (ed) Experiencias en FBN en Soja. Resultados del Proyecto Inocular (en prensa).

FERRARIS, G., L. COURETOT, M. TORIBIO Y R FALCONI. 2008. Efecto de diferentes estrategias de fertilización sobre el rendimiento de maíz y el balance de nutrientes en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. pp17-22. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. IPNI. N 37.

GARCIA, F.O.; M. BOXLER; J. MINTEGUIAGA; R. POZZI; L. FIRPO; G. DEZA MARIN y A. BERARDO. 2006. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe-Resultados y Conclusiones de los primeros 6 años 2000-2005. AACREA.

GUTIERREZ, BOEM F.H. y G. THOMAS. 1998. Phosphorus nutrition affects wheat response to water deficit. *Agronomy Journal* 90: 166-171.

GUTIERREZ, BOEM F.H., F. GARCIA y M. BOXLER. 2010 ¿Qué tan distintos son los niveles críticos de fósforo disponible para soja, maíz y trigo? En: Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Comisión 3. Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal. Rosario, Santa Fe.

MARSCHNER, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London 2nd edition. 889 pp.
MOLLIER, A. and S. PELLERIN. 1999. Maize root system growth and development as influenced by P deficiency. *Journal Experimental of Botany* 50 (333): 487-497.

PLENET, D.; S. ETCHEBEST; A. MOLLIER and S. PELLERIN. 2000. Growth analysis of maize field crops under P deficiency. *Plant and Soil* 223(1-2): 119-132.

PRYSTUPA, P, F.H. GUTIERREZ BOEM, F. SALVAGIOTTI G. FERRARIS & L. COURETOT. 2006. Measuring Corn Response to Fertilization in the Northern Pampas. *Better Crops*. Vol 90 (2):25-27.