

¿Fertilización fosfatada por suficiencia o restitución en secuencias agrícolas de la pampa arenosa?

M. Barraco^{1,*}, M. Díaz-Zorita², C. Justo³ y A. Lardone¹

Introducción

La disponibilidad de estrategias de diagnóstico y recomendación de la fertilización con fósforo (P) en sistemas agrícolas responden a distintos criterios de manejo de la práctica, basados entre otros conceptos en los de suficiencia o de restitución por balance del nutriente. Los planteos según criterios de suficiencia procuran corregir necesidades anuales de P ("fertilizando el cultivo") y conducen en el largo plazo al establecimiento de rendimientos de entre el 5% y el 10% inferiores al máximo alcanzable, al reducir potenciales riesgos de no lograr respuestas rentables en el año de aplicación de la corrección (Leikam et al., 2010). Ésta es una estrategia frecuente en condiciones de limitados recursos para inversiones, tenencias de la tierra de corto plazo y requiere del frecuente y preciso muestreo y análisis de suelos, conduciendo a la generalización de limitaciones en los nutrientes en el largo plazo. En contraposición, los planteos de fertilización por restitución se independizan en parte de los cultivos, buscando correcciones que compensen la extracción de nutrientes y el mantenimiento de niveles nutricionales que no limiten la productividad, maximizando los rendimientos (Leikam et al., 2010).

La información disponible comparando los efectos de largo plazo de estas estrategias de fertilización bajo condiciones extensivas de producción es limitada. Se supone que al aplicarse modelos de fertilización por suficiencia se tenderá a la disminución en los niveles extractables de fósforo. En cambio, al aplicarse modelos de restitución por balance, la oferta de P tenderá a estabilizarse y se reducirá la variabilidad en la productividad de los cultivos, al disminuir la frecuencia de sectores con niveles de P potencialmente limitantes.

Los objetivos de este estudio fueron: i) evaluar el efecto de dos estrategias de fertilización fosfatada en el largo plazo sobre la productividad de cultivos de maíz (*Zea mays*), trigo (*Triticum aestivum*), soja (*Glycine max*) y girasol (*Helianthus annuus*) en rotación; y ii) estimar los efectos sobre los contenidos de P de los granos y P extractable de los suelos (Pe), después de 12 años de estudio en un sitio representativo de la región de la pampa arenosa argentina.

Materiales y métodos

El ensayo se estableció en un módulo de producción agrícola de 72 ha ubicado en el Campo Experimental de la EEA de INTA en General Villegas (34° 54'S, 63° 44'W) en

Drabble (Buenos Aires), sobre un suelo con predominio de Hapludoles típicos, franco arenosos en consociación con Hapludoles thapto argicos (Alfieri et al., 1991) (Materia orgánica = 27.1 g kg⁻¹, P Bray 1 (Pe) = 22 mg kg⁻¹, pH = 6.2).

El módulo se instaló en el año 1996 con una secuencia agrícola de 6 años de duración (maíz-soja de primera-girasol-trigo/soja de segunda-maíz-girasol) bajo prácticas de labranza cero, en franjas de 12 ha para cada cultivo, de manera de instalar todas las fases de la secuencia todos los años. Durante el periodo 1996 a 2001, los cultivos no recibieron fertilización con P.

En el otoño de 2001, en cada franja, se establecieron dos estrategias de fertilización fosfatada: i) de suficiencia y ii) de restitución por balance del P aparentemente extraído por los cultivos. Para el criterio de suficiencia se consideraron umbrales de P del suelo (capa de 0 a 20 cm) de 18 mg kg⁻¹ para maíz y trigo (Hanway y Olson, 1980) y de 12 mg kg⁻¹ para soja y girasol (Ferraris y Couretot, 2004; Díaz-Zorita, 2005). Para la estrategia de restitución se estimó el P extraído para una producción promedio de 9000 kg ha⁻¹ de maíz, 4000 kg ha⁻¹ de trigo, 4000 kg ha⁻¹ de girasol, 3500 kg ha⁻¹ de soja de primera y 2000 kg ha⁻¹ de soja de segunda según la concentración de P media de los granos propuestas por Andrade et al. (1996). En la **Tabla 1** se presentan las dosis medias de P agregadas en cada cultivo según las estrategias de fertilización aplicadas.

En todos los tratamientos, las aplicaciones de P se realizaron en el momento de la siembra en forma de fosfato monoamónico (11-23-0). En girasol y soja, en aquellos casos en que las dosis de fertilizante resultaron superiores a 45 kg ha⁻¹ de fertilizante comercial se aplicaron fraccionadas en partes equivalentes en el surco y en el entresurco para reducir riesgos de fitotoxicidad

Tabla 1. Dosis de P agregado según el cultivo y estrategia de fertilización. Promedio de 12 campañas.

Cultivo	Estrategia de fertilización	
	Suficiencia	Restitución
	----- Dosis de P, kg ha ⁻¹ -----	
Maíz	14	27
Trigo	15	30
Soja de segunda	0	11
Girasol	0	13
Soja de primera	0	15

¹ EEA INTA General Villegas. *Corre electrónico: barraco.miriam@inta.gob.ar

² CONICET y Novozymes Bioag S.A.

³ Consultora Privada.

en las semillas. El manejo de los cultivos se realizó bajo condiciones de alta producción representativas de la región de la pampa arenosa, con fechas de siembra de inicio de junio en trigo, inicios de octubre en maíz, mediados de octubre en girasol, inicios de noviembre para soja de primera y mediados a fin de diciembre en soja de segunda. Se realizaron controles químicos de malezas en el barbecho y en el ciclo de los cultivos, fertilización nitrogenada con aportes equivalentes a 140 kg ha⁻¹ de N en maíz y en trigo ($N_{\text{suelo}} + N_{\text{fertilizante}}$), inoculación de semillas de soja con *Bradyrhizobium japonicum*, control de plagas y enfermedades según monitoreo.

En los otoños del 2001 (año 1) y del 2013 (año 12) se tomaron muestras compuestas de los suelos georeferenciadas (capa de 0 a 20 cm), siguiendo un muestreo en grilla con 6 estaciones de muestreo por franja de cultivo y modelo de fertilización, para la determinación de los contenidos de P extractable (Pe, Bray y Kurtz, 1945). Anualmente se determinó la producción de grano de los cultivos, por cosecha y trilla manual de muestras de 3 m² de cada cultivo, coincidentes con las posiciones georeferenciadas en donde se realizaron las determinaciones de Pe (6 muestras por criterio de fertilización). Los resultados de producción se expresaron corregidos a contenidos de humedad de 14%. Además, en el año 12 del estudio (2013) se determinó la concentración de P en los granos (6 muestras/criterio de fertilización) para la estimación del balance de P (BP) según la diferencia entre el P extraído en los granos (Pgr) y el P aplicado al fertilizar (Pfert): $BP \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} \times \text{Pgr (kg kg}^{-1}\text{)} - \text{Pfert (kg ha}^{-1}\text{)}$. Los cálculos se expresaron en base seca (0% de humedad).

Se desarrollaron análisis descriptivos de los rendimientos

y de los contenidos de Pe de los suelos. Además los rendimientos se evaluaron en forma individual para cada campaña y en un análisis combinado, considerando a los criterios de fertilización como tratamientos y a las campañas como bloques (con las 6 muestras anidadas). La comparación múltiple de medias se realizó mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 10%. Los contenidos de P de los granos de la campaña 2012 se analizaron mediante el test t. Para todos los análisis se empleó el programa estadístico InfoStat versión 2014 (Di Rienzo et al., 2014).

En la **Tabla 2** se presentan las precipitaciones mensuales del periodo en estudio, mostrando una gran variabilidad entre campañas, (característica de la pampa arenosa) sobre todo en el periodo primavera-estival.

Resultados y discusión

Rendimiento de los cultivos

Los rendimientos de maíz variaron entre 300 y 12 735 kg ha⁻¹, con rendimientos medios de 8580 kg ha⁻¹. En las campañas 2001, 2003, 2005 y 2008, los rendimientos de los cultivos bajo prácticas continuas de fertilización según un modelo de restitución fueron significativamente mayores que los observados según el modelo de suficiencia, mientras que para el resto de las campañas los rendimientos medios fueron similares entre estrategias de fertilización, (**Figura 1**). En promedio, las diferencias de rendimiento entre las dos estrategias de fertilización fueron significativas ($p=0.07$) y los cultivos fertilizados según el criterio de restitución rindieron en promedio 526 kg ha⁻¹ más que los cultivos manejados con suficiencia de P.

Tabla 2. Precipitaciones mensuales en mm durante el periodo de estudio. Fuente: Estación Meteorológica de la EEA INTA General Villegas.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
2001	131	22	259	157	34	10	3	51	129	139	120	65	1118
2002	218	21	122	50	56	3	12	58	28	198	114	92	972
2003	41	129	91	8	0	4	5	0	11	36	90	41	454
2004	278	28	36	105	86	0	48	22	0	133	112	17	865
2005	199	55	254	19	3	12	51	25	38	38	165	38	894
2006	210	66	148	92	11	9	11	1	10	189	88	156	990
2007	113	151	228	32	14	17	2	2	86	49	29	99	823
2008	93	68	54	9	2	16	30	0	30	96	131	41	570
2009	25	111	42	55	20	0	29	1	80	10	121	311	804
2010	217	147	27	38	23	14	4	2	107	64	19	26	687
2011	128	83	50	100	10	7	11	1	8	78	62	3	540
2012	80	283	127	71	79	6	0	69	60	271	170	60	1275
2013	8	20	104	35	48	4	18	0	39	71	104	78	529

En los cultivos de trigo, la producción de grano varió entre 500 y 4864 kg ha⁻¹, con rendimientos medios de 3328 kg ha⁻¹ (**Figura 2a**). En el 50% de las campañas evaluadas (2003, 2005, 2006, 2008, 2010 y 2011), los rendimientos de los cultivos según un modelo de restitución fueron mayores que los observados según el modelo de

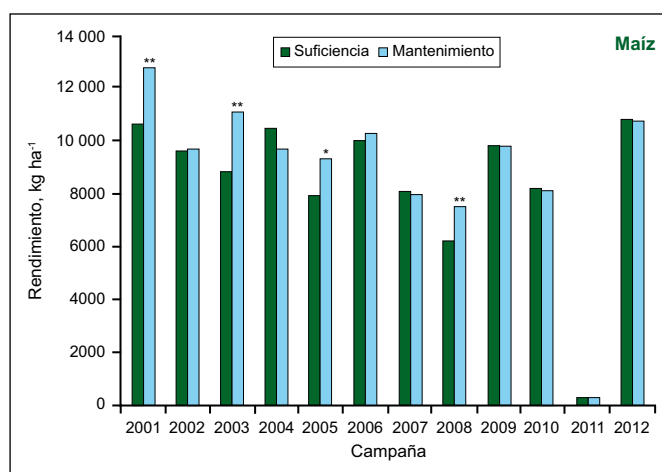


Figura 1. Rendimientos de maíz según dos criterios de fertilización con fósforo. Dentro de cada campaña, * y ** indican diferencias significativas según Tukey al 10% y al 1%, respectivamente, entre criterios de fertilización.

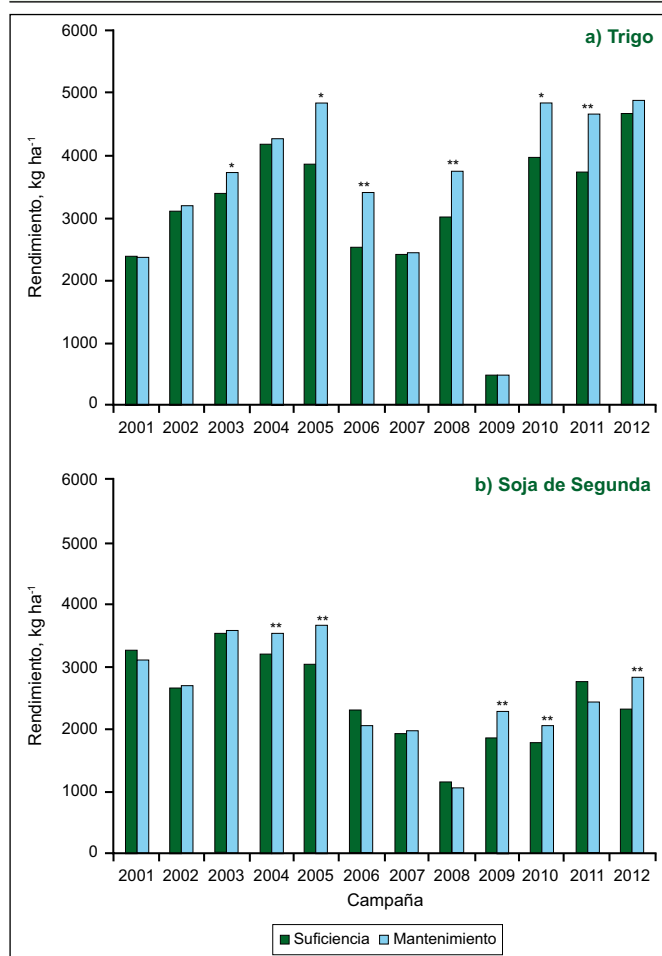


Figura 2. Rendimientos de trigo (a) y de soja de segunda (b) según dos criterios de fertilización con fósforo. Dentro de cada campaña, * y ** indican diferencias significativas según Tukey al 10% y al 1%, respectivamente, entre criterios de fertilización.

suficiencia ($p < 0.10$), mientras que en las campañas restantes fueron similares entre ellos. En promedio, las diferencias de rendimiento entre las dos estrategias de fertilización fueron altamente significativas ($p < 0.01$) y los cultivos fertilizados según el criterio de restitución rindieron en promedio 472 kg ha⁻¹ más que los cultivos manejados con suficiencia de P.

Los rendimientos de soja de segunda variaron entre 1057 y 3368 kg ha⁻¹, con rendimientos medios de 2556 kg ha⁻¹ y con diferencias significativas entre criterios de fertilización ($p = 0.07$) (**Figura 2b**). En las campañas 2005, 2006, 2009, 2010 y 2012, los rendimientos de los cultivos bajo prácticas continuas de fertilización según un modelo de restitución fueron significativamente mayores que los observados según el modelo de suficiencia ($p < 0.10$), mientras que la diferencia de rendimiento entre las dos estrategias de fertilización fue de 111 kg ha⁻¹ cuando se promediaron los 12 años evaluados. Considerando la secuencia trigo/soja de segunda, los rendimientos según el modelo de restitución fueron un 11% superiores que sobre un modelo de suficiencia (6200 versus 5588 kg ha⁻¹, respectivamente).

En soja de primera, los rendimientos variaron entre 1366 y 4856 kg ha⁻¹, con rendimientos medios de 3868 kg ha⁻¹. Si bien en las campañas 2005, 2008, 2009 y 2012, los rendimientos de los cultivos bajo prácticas continuas de fertilización según un modelo de restitución fueron significativamente mayores que los observados según el modelo de suficiencia ($p < 0.10$), en el análisis en conjunto de todas las campañas éstas diferencias no resultaron significativas ($p = 0.28$), (**Figura 3a**). La diferencia de rendimientos entre las dos estrategias de fertilización fue de 141 kg ha⁻¹ cuando se promediaron los 12 años evaluados.

La producción de girasol varió entre 350 y 4589 kg ha⁻¹, con rendimientos medios de 3015 kg ha⁻¹. En el análisis en conjunto no se observaron diferencias significativas entre criterios de fertilización ($p = 0.48$) y solo en dos campañas los rendimientos resultaron superiores con el criterio de restitución de P (**Figura 3b**). La diferencia de rendimientos, promedio de los 12 años de evaluación, fue de 124 kg ha⁻¹ mayor con planteos de fertilización por restitución.

La producción acumulada de la secuencia agrícola (7 cultivos en 6 campañas) mostró una producción promedio de 32 170 kg grano ha⁻¹ para el criterio de suficiencia y de 33 999 kg grano ha⁻¹ para el criterio de restitución (**Figura 4**).

Contenidos de P en granos y balance de P al año 12

Luego de 12 años de aplicación de modelos contrastantes de manejo de la fertilización con P, la concentración de P en los granos fue similar bajo prácticas de restitución que al fertilizar por suficiencia en cultivos de maíz y trigo (**Tabla 3**). En soja de primera y soja de segunda fue un 6.2% y 6.6% superior, respectivamente en la estrategia de fertilización por restitución, mientras que en girasol

se observó menores contenidos de P con dicha estrategia (Tabla 3). Resultados similares en cultivos de soja fueron reportados por Ventimiglia et al. (2012). El balance de P resultó negativo en la mayoría de los cultivos bajo la estrategia de suficiencia, a excepción de trigo donde resultó levemente positivo (Tabla 3). Al aplicarse la estrategia de restitución, el balance fue positivo para

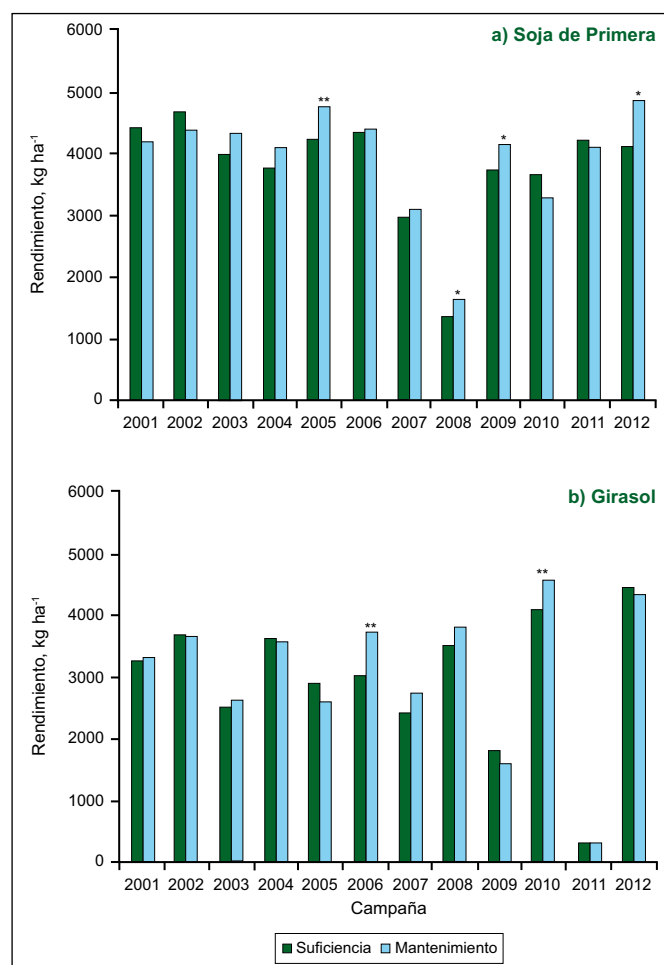


Figura 3. Rendimientos de soja de primera (a) y de girasol (b) según dos criterios de fertilización con fósforo. Dentro de cada campaña, * y ** indican diferencias significativas según Tukey al 10% y al 1%, respectivamente, entre criterios de fertilización.

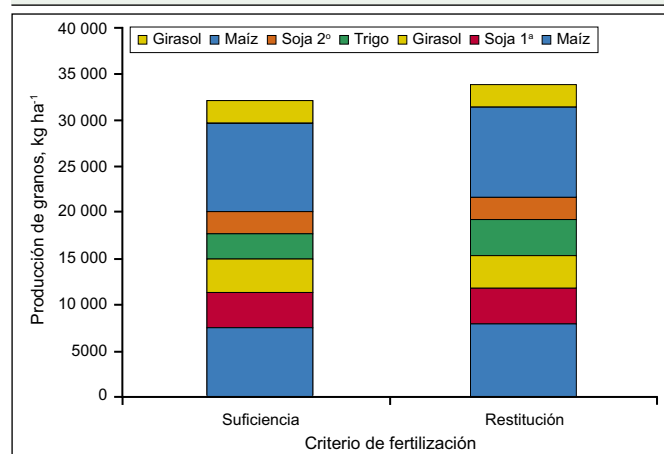


Figura 4. Producción acumulada en una secuencia maíz-soja de primera-girasol-trigo/soja de segunda-maíz-girasol según dos criterios de fertilización con P. Promedio de 12 campañas de estudio.

maíz y trigo debido a que los rendimientos obtenidos resultaron inferiores a los estimados al calcular la dosis de restitución. En cambio, en soja y girasol el balance de P fue negativo como consecuencia de mayores rendimientos con respecto a los previstos en el planteo original (Tabla 3). En soja de segunda, el balance resultó neutro, pero si se adiciona lo aportado en el trigo se supera lo extraído por los dos cultivos. Considerando a la rotación en estudio, el balance global del sistema hasta la campaña 2012 fue de -43.8 kg de P para el criterio de suficiencia y de +22.6 kg P para el criterio de restitución.

Evolución de P en los suelos

Al inicio del estudio los niveles de Pe de los suelos variaron entre 12.1 y 60.7 mg kg⁻¹, mientras que en el año 2013 variaron entre 6.9 y 56.9 mg kg⁻¹ para la estrategia de suficiencia y entre 17.5 y 54.0 mg kg⁻¹ para la estrategia de restitución. En promedio, luego de 12 años en los planteos por suficiencia éstos se redujeron a razón de 0.7 mg kg⁻¹ año⁻¹ mientras que al considerarse una estrategia de restitución se incrementaron en 0.5 mg kg⁻¹ año⁻¹ (Tabla 4). Además, con la estrategia de suficiencia se observó un incremento en la variabilidad de Pe entre los puntos geo-referenciados, en tanto que la variabilidad en los contenidos de Pe entre puntos disminuyó con la estrategia de restitución (Tabla 4).

Finalmente, con la estrategia de suficiencia de P se observó en el año 12 un 50% de los puntos geo-referenciados con niveles sub-óptimos para la producción de soja y girasol (Pe < 11 mg kg⁻¹) y 75% de los puntos con niveles sub-óptimos para maíz y trigo (Pe < 18 mg kg⁻¹). En contraposición, con la estrategia de restitución de P ningún punto mostró valores sub-óptimos para soja y girasol y sólo un 1% para maíz y trigo (Tabla 4).

Conclusiones

La aplicación de estrategias de fertilización de restitución de P durante 12 años consecutivos en un suelo representativo de la región de la pampa arenosa con niveles medios a altos de Pe permitió alcanzar mayores rendimientos que bajo planteos de fertilización de suficiencia. Estas mejoras fueron del 6.3% en maíz y del 15.2% en trigo mientras que en cultivos oleaginosos las diferencias fueron menores (3.7% en soja de primera, 4.4% en soja de segunda y 3.4% en girasol).

Al fertilizar anualmente con criterios de suficiencia se redujeron los niveles de Pe a razón de aproximadamente 0.7 mg kg⁻¹ año⁻¹ mientras que las correcciones de reposición los incrementaron a razón de 0.5 mg kg⁻¹ año⁻¹.

Si bien ambas estrategias se diferencian en las dosis anuales de fertilización con P, este estudio contribuye al análisis de los efectos de largo plazo de la aplicación continua de decisiones de manejo del nutriente, aplicable a una amplia área agrícola de la región pampeana. Las mayores respuestas sobre los cultivos de cereales sugieren la posibilidad de establecer planteos combinados de fertilización, con aplicación de reposición

Tabla 3. Contenido de P de los granos, P extraído por los cultivos, P aportado por la fertilización (P aplicado) y balance de P según dos criterios de fertilización con P en Hapludoles de la región de la pampa arenosa. Campaña 2012/13. Datos expresados en base seca (0% de humedad).

Cultivos	Criterio de fertilización con P							
	Suficiencia				Restitución			
	P en grano %	P extraído	P aplicado kg P ha ⁻¹	Balance	P en grano %	P extraído	P aplicado kg P ha ⁻¹	Balance
Maíz	0.19	18.4	13.0	-5.4	0.20	18.8	27.0	+8.2
Trigo	0.35	13.6	17.0	+3.4	0.35	14.6	34.0	+19.4
Soja 1 ^a	0.36	12.8	0.0	-12.8	0.38	16.0	12.0	-4.0
Soja 2 ^o	0.41	8.2	0.0	-8.2	0.43	10.6	10.0	-0.6
Girasol	0.48	18.5	0.0	-18.5	0.42	16.3	12.0	-4.3

Tabla 4. Concentración de P extractable de los suelos (Pe, Bray y Kurtz 1) al inicio (Año 1) y final del estudio (Año 12) según criterios de fertilización con P en Hapludoles de la región de la pampa arenosa: DS (Desvío estándar), CV (Coeficiente de variación en %), P25, P50, P75 (Percentil 25, 50 y 75, respectivamente).

Criterio de fertilización con P	Muestreo	Pe					
		Media	DS	CV	P25	P50	P75
		mg kg ⁻¹		%	mg kg ⁻¹		
Suficiencia	Año 1	23.3	7.9	33.7	19.10	21.6	25.4
	Año 12	15.0	10.3	68.6	9.6	11.7	15.3
Restitución	Año 1	22.5	8.8	39.5	17.3	20.1	22.6
	Año 12	28.9	7.9	27.4	23.2	27.7	33.2

antes de la siembra de cereales y planteos de suficiencia al sembrar oleaginosas.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por los proyectos de INTA: BANOR 710011 "Desarrollo y transferencia de tecnología para la producción sustentable de los sistemas agrícolas en el norte de la provincia de Buenos Aires" y BANOR 1271305 "Contribución del INTA al desarrollo sustentable del territorio del noroeste bonaerense". Los autores agradecen al International Plant Nutrition Institute (IPNI) por la financiación para los análisis de P de los granos.

Bibliografía

Alfieri, A.E., J.C. Viale, R.E. Sobral. 1991. Carta de suelos del campo experimental de la EEA General Villegas. INTA CIRN, 90 p.

Andrade, F., H. Echeverría, N. Gonzalez, S. Uhart, y N. Darwich. 1996. Requerimientos de nitrógeno y fósforo de los cultivos de maíz, girasol y soja. Boletín Técnico N° 134. EEA INTA Balcarce. Argentina.

Bray, R.H, y L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci. 59:39-45.

Díaz-Zorita, M. 2005. Capítulo 14: Girasol. En: Echeverría, H.E.; García, F.O. (Eds.). Fertilidad de

suelos y fertilización de cultivos. Balcarce: Ediciones INTA. 307 p.

Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C.W. Robledo. 2014. InfoStat versión 2014. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en <http://www.infostat.com.ar>. [Fecha de acceso 12/8/2014].

Ferraris, G. y L. Couretot. 2004. Fertilización fosforada en soja. Diagnóstico y tecnología de aplicación. Revista de Tecnología Agropecuaria, EEA INTA Pergamino, IX(26):46-49.

Hanway, J. y R. Olson. 1980. Phosphate nutrition of corn, sorghum, soybeans and small grains. In: Khasawneh, F., E. Sample y E. Kamprath (Eds.). The role of Phosphorus in Agriculture. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI.

Leikam, D., G. Randall, y A. Mallarino. 2010. Are current soil test-based phosphorus and potassium fertilizer recommendations adequate?. Crops and Soils 43:27-32.

Ventimiglia, L., L. Torrens Baudrix, y M. Saks. 2012. Fósforo en la monocultura sojera: Efecto de la dosis, forma y momento de aplicación sobre el balance nutricional. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. 6:23-26.✻