

# Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos y el balance de nutrientes

Gustavo N. Ferraris<sup>1</sup>, Mirta Toribio<sup>2</sup>, Ricardo Falconi<sup>3</sup> y Lucrecia Couretot<sup>1</sup>

## Introducción

A nivel productivo, las deficiencias de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) no ocurren de manera aislada sino que se combinan de diversas maneras, por lo que es necesario evaluar integralmente la respuesta a la fertilización y conocer su efecto sobre la fertilidad de los suelos. Con el propósito de estudiar la evolución en el tiempo de los rendimientos, el balance de nutrientes y las propiedades químicas del suelo, se diseñó un ensayo de estrategias de fertilización en la secuencia maíz-soja-trigo/soja-cebada/soja. El proyecto se inició en la campaña 2006/07, siendo maíz el primero de los cultivos implantados, prosiguiendo con soja en el ciclo 2007/08, trigo/soja en 2008/09 y cebada/soja en 2009/10. Información de los primeros años del ensayo están disponibles en Ferraris et al. (2010).

En la campaña 2010/11 se inició una nueva secuencia de la rotación, con el cultivo de maíz. Los objetivos planteados durante el quinto año fueron:

- 1) Evaluar el efecto de diferentes estrategias de fertilización sobre el rendimiento de maíz.
- 2) Determinar la evolución de los niveles de N, P, S, materia orgánica (MO) y pH de suelo de acuerdo con las estrategias de fertilización y los rendimientos obtenidos en los cultivos previos.
- 3) Cuantificar y valorizar el balance de nutrientes luego de cinco campañas y siete cultivos.
- 4) Realizar una evaluación económica integrando toda la secuencia.

## Materiales y métodos

El ensayo es conducido sobre un suelo serie Rojas, Argiudol típico, Clase de uso I de muy buena productividad, en la localidad de Arribeños, partido de General Arenales, provincia de Buenos Aires, Argentina. Se planteó un diseño en bloques al azar, con cuatro repeticiones, en una rotación maíz-soja-trigo/soja-cebada/soja. Los tratamientos de fertilización se repiten todos los años sobre las mismas parcelas. En el ciclo 2010/11, el cultivar de maíz sembrado fue Nidera AX 886 MG. Los fertilizantes fueron aplicados a la siembra en las dosis que se presentan en la **Tabla 1**. Como fuentes fertilizantes se utilizaron urea granulada (46-0-0), superfosfato triple de calcio (0-20-0) y sulfato de calcio (0-0-0-18S).

## Determinaciones realizadas

### En el suelo

Previo a la siembra se tomaron muestras de suelo a 0-20 cm. De cada parcela, se extrajo una muestra compuesta, y se determinó el pH y los contenidos de MO, P extractable (Bray I), N total, N-nitratos (N-NO<sub>3</sub>) y S-sulfatos (S-SO<sub>4</sub>).

### En el cultivo

A la cosecha se evaluaron el rendimiento y el contenido de N, P y S en el grano. Con los datos de rendimiento, concentración de nutrientes en el grano y dosis aplicada de los mismos se realizó un balance de nutrientes.

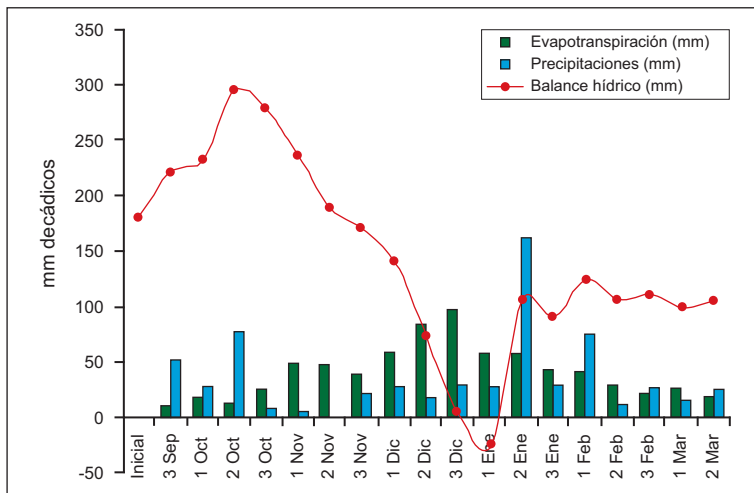
**Tabla 1. Tratamientos y dosis (kg ha<sup>-1</sup>) de N, P y S aplicados en maíz. Estrategias de fertilización en una secuencia de cultivos. Campaña 2010/11, quinto año de ensayos. Arribeños, General Arenales, Buenos Aires.**

Tratamiento	Criterio de fertilización	Rendimiento objetivo	N	P	S
			----- kg ha <sup>-1</sup> -----		
T1	Testigo sin fertilización	No especificado	0	0	0
T2	Tecnología uso actual	No especificado	46	16	0
T3	Reposición PS Rendimiento objetivo medio	10 000 kg ha <sup>-1</sup>	94	30	18
T4	Reposición PS Rendimiento objetivo alto	12 000 kg ha <sup>-1</sup>	114	30	18
T5	Reposición S Reconstrucción P Rendimiento objetivo alto	12 000 kg ha <sup>-1</sup>	114	46	18

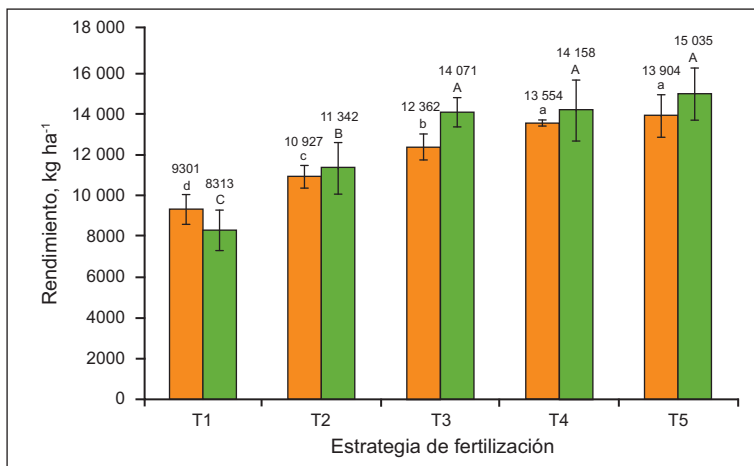
<sup>1</sup> INTA Pergamino. Correo electrónico: [nferraris@pergamino.inta.gov.ar](mailto:nferraris@pergamino.inta.gov.ar)

<sup>2</sup> Profertil S.A. Investigación y Desarrollo.

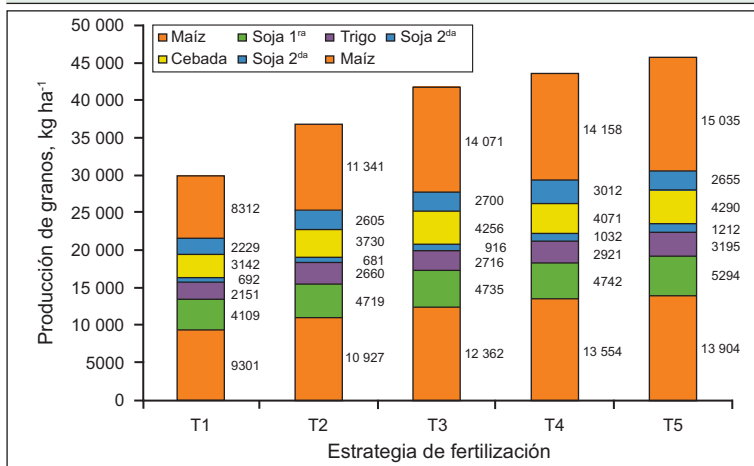
<sup>3</sup> El Ceibo Cereales S.A.



**Figura 1.** Balance hídrico por periodo decádico (mm) en el sitio experimental. Agua disponible inicial en el suelo 180 mm (200 cm profundidad). Precipitaciones en el ciclo 622 mm. Déficit de evapotranspiración 26 mm. Arribeños, Buenos Aires, Campaña 2010/11.



**Figura 2.** Rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de maíz bajo diferentes estrategias de fertilización para la campaña 2010/11 (columnas verdes) en comparación con el ciclo inicial 2006/07 (columnas naranjas). Ensayo de estrategias de fertilización en una secuencia de cultivos. Arribeños, General Arenales, Buenos Aires. Letras minúsculas y mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para las campañas 2006/07 y 2010/11, respectivamente. Las barras verticales representan el desvío estándar de la media.



**Figura 3.** Producción acumulada ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) bajo diferentes estrategias de fertilización en una secuencia maíz-soja-trigo/soja-cebada/soja-maíz. Arribeños, General Arenales, Buenos Aires. Campañas 2006/07 a 2010/11.

### Caracterización agroclimática

Durante el ciclo 2010/11, las precipitaciones alcanzaron valores por debajo de la demanda ambiental durante noviembre y diciembre, y fueron normales durante el resto del período. Gracias a las buenas reservas iniciales provenientes del año húmedo anterior, el cultivo sólo expresó un déficit de 26 mm (Figura 1). Por otra parte, sólo se registraron 2 días de escasa heliofanía entre 10 de diciembre y 10 de enero, las condiciones de luminosidad fueron muy favorables durante esta campaña.

### Resultados y discusión

#### Rendimientos de maíz 2010/11

Como en campañas anteriores, las diferencias de rendimiento entre tratamientos fueron estadísticamente significativas ( $P = 0.001$ ;  $CV = 8.1\%$ ) (Figura 2). Los rendimientos de maíz fueron superiores en los tratamientos T3, T4 y T5 respecto a T1 y T2. Comparando los rendimientos de la presente campaña (2010/11) con el primer año de experimentación (2006/07), una campaña climáticamente favorable, se observa que los rendimientos se incrementaron en los tratamientos T3, T4, y T5 en 2010/11 respecto a 2006/07, fueron similares para ambas campañas en el caso de T2 y disminuyeron en 2010/11 respecto a 2006/07 en el caso de T1. Estas diferencias entre la campaña inicial y la de 2010/11 muestran una consistente tendencia de construcción, mantenimiento, o disminución de fertilidad, respectivamente.

La producción acumulada de la secuencia agrícola –siete cultivos en cinco campañas– muestra una tendencia de ampliar la brecha entre tratamientos conforme el paso del tiempo. Así, mientras el testigo acumuló  $29\,937 \text{ kg grano ha}^{-1}$ , el tratamiento de reconstrucción llegó a  $45\,585 \text{ kg ha}^{-1}$ , siendo la brecha de rendimiento del 52.2% (Figura 3).

El nivel nutricional de cada tratamiento se reflejó en la concentración de N y P en grano, aunque no en el caso de S (Tabla 2). La concentración de N en grano de maíz fue 36.4% superior en T5 con relación a T1, mientras que esa misma comparación para P evidenció un incremento de 41.2%. El hecho que las diferencias de concentración fueron de una magnitud similar al incremento en los rendimientos, estaría reflejando una severa deficiencia de N y P en T1 y T2, más que un consumo de lujo en los tratamientos de mayor fertilización. La concentración de S en grano no se vio afectada por los tratamientos y fue baja en todos los casos.

## Balance de nutrientes y cambios en la disponibilidad de P en el suelo

Los diferentes tratamientos generaron balances de nutrientes negativos para N, y cercanos a la tendencia prevista para P y S (Tabla 3). Así, en P fueron deficitarios los tratamientos T1 y T2, próximos a la neutralidad T3 y

T4, y positivo en T5. Sólo el tratamiento de reconstrucción logró con su aporte superar la exportación de P del cultivo. En el caso de S, las estrategias mostraron un balance negativo en T1 y T2, y muy cercano a la neutralidad en T3, T4 y T5.

Luego de la cosecha de maíz 2010/11 y previo a la siembra de la soja 2011/12, se realizó un análisis completo de suelo por parcela, cuyos datos promedios se consignan en la Tabla 4. En este experimento, la dosis necesaria para mantener el nivel de P en suelo habría sido ligeramente sobreestimada, puesto que con rendimientos mayores a los previstos, los tratamientos T3 y T4 lograron incrementar ligeramente el nivel de P Bray original del sitio, que en 2006 alcanzaba 8.5 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 4). Asimismo, el incremento alcanzado en T5 fue superior al propuesto. Se agregaron 16 kg de P ha<sup>-1</sup> adicionales a la dosis prevista de reposición con el objetivo de incrementar la disponibilidad de P en suelo en 2 mg kg<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Luego de 5 campañas debería traducirse en un cambio desde 8.5 a 18.5 mg kg<sup>-1</sup>, valor inferior al determinado actualmente (Figura 4). En línea con esta observación, sobre un grupo de experimentos

**Tabla 2. Concentración de N, P y S en grano de maíz (% sobre base seca) para los diferentes tratamientos de fertilización.**

Tratamiento	----- Concentración en grano, % -----		
	N	P	S
T1	1.07 b*	0.17 c	0.08 b
T2	1.13 b	0.20 bc	0.09 ab
T3	1.31 a	0.23 ab	0.10 a
T4	1.34 a	0.24 a	0.10 a
T5	1.46 a	0.24 a	0.09 ab

\* Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para cada nutriente (P < 0.05).

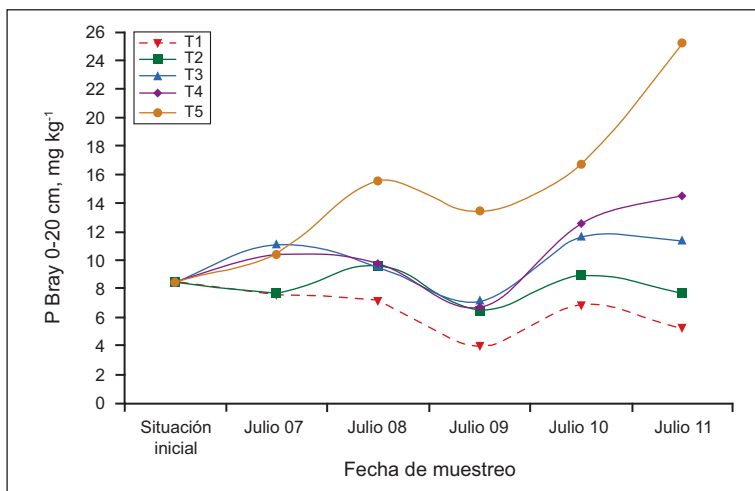
**Tabla 3. Balance de N, P, y S para los diferentes tratamientos. Los datos de rendimiento y concentración de nutrientes en grano fueron ajustados a 13% de humedad.**

Tratamiento	----- Agregado, kg ha <sup>-1</sup> -----			----- Extracción, kg ha <sup>-1</sup> -----			----- Balance, kg ha <sup>-1</sup> -----		
	N	P	S	N	P	S	N	P	S
T1	0	0	0	77.3	12.4	6	-77.3	-12.4	-6
T2	46	16	0	111.3	19.5	8.4	-65.3	-3.5	-8.4
T3	94	30	18	160.7	27.6	11.9	-66.7	2.4	6.1
T4	114	30	18	164.3	29	12	-50.3	1	6
T5	114	46	18	190.9	32	12.2	-76.9	14	5.8

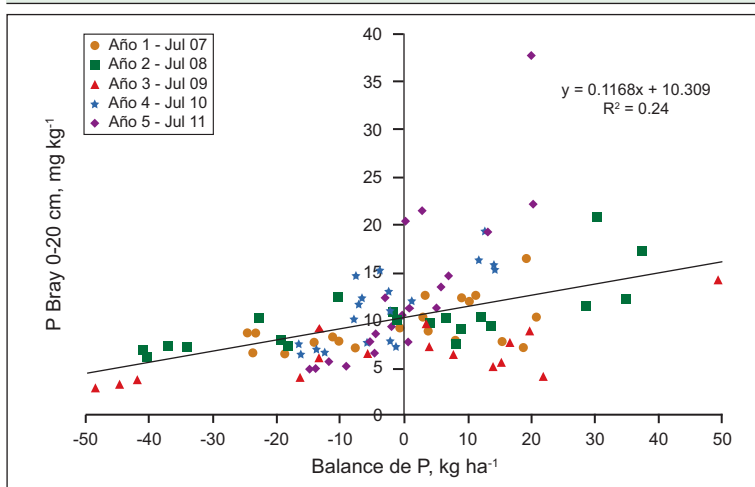
**Tabla 4. Análisis de suelo luego de la cosecha de maíz y previo a la siembra de soja (julio 2011). Los datos son promedio de cuatro repeticiones.**

Tratamiento	Profundidad cm	MO	N total	pH	P	S-SO <sub>4</sub>
		----- % -----	----- mg kg <sup>-1</sup> -----			
T1	0-20	2.62	0.131	5.98	5.20 c	8.6 c
	20-40				7.1 C	
T2	0-20	2.51	0.126	5.83	7.68 c	9.8 bc
	20-40				8.5 C	
T3	0-20	2.68	0.134	5.88	11.35 bc	13.1 a
	20-40				10.9 B	
T4	0-20	2.63	0.131	5.88	14.50 b	12.1 ab
	20-40				10.5 B	
T5	0-20	2.59	0.130	5.83	25.18 a	14.2 a
	20-40				13.1 A	

\* Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para cada nutriente e igual profundidad (P < 0.05).



**Figura 4. Evolución del P disponible en suelo (Bray-1; 0-20 cm) luego de cinco campañas y siete cultivos. Los valores presentados son promedio de cuatro repeticiones.**



**Figura 5. Relación entre el nivel de P Bray del suelo a la cosecha ( $\text{mg kg}^{-1}$ ; 0-20 cm) y el balance de P (aplicado-extraído en  $\text{kg ha}^{-1}$ ) utilizando los valores provenientes de cada parcela al final de cada campaña. La inversa de la pendiente indica la cantidad de P como diferencia (aplicado-extraído) que provoca un cambio de  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  en la disponibilidad de P en suelo (0-20 cm). Arribeños, General Arenales, Buenos Aires.**

de larga duración, Mallarino y Prater (2007) postulan que la tasa de incremento de P en suelo es superior en un rango medio de disponibilidad, y que una vez alcanzado un nivel alto es necesario agregar mayores dosis de P para mantener y/o aumentar su disponibilidad en el suelo, por el pasaje permanente de P a fracciones más estables. El S también refleja un marcado contraste entre aquellos tratamientos con fertilización azufrada (T3, T4, T5) o sin ella (T1, T2). En cambio, no se observaron diferencias entre tratamientos en términos de MO, pH o N total (Tabla 4).

La relación entre el P Bray y el balance acumulado al final de cada campaña en cada parcela a lo largo del tiempo permite sugerir una medida de la tasa de cambio del nutriente en el largo plazo, cuantificar la dosis necesaria para recomponer la disponibilidad del nutriente en un nivel que se fije como objetivo, y servir

de base como criterio de recomendación. La inversa de la pendiente de esta relación sugiere la tasa de cambio. Finalizada la campaña 2010/11, la función ajustada indica que es necesario agregar  $8.56 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  para incrementar la disponibilidad de P en  $1 \text{ mg kg}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Figura 6). Lo mismo se observa si el balance es negativo: el P Bray (0-20 cm) disminuye en  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  por cada  $8.56 \text{ kg}$  de P como extracción neta. El ajuste a través de una función única obedece a que los parámetros no diferían significativamente ( $P > 0.10$ ) de un modelo bifuncional que separase las parcelas con balance positivo y negativo, a diferencia de lo observado por Ciampitti (2009). Según el balance de P acumulado, el rango de variación de la tasa de cambio de P Bray a lo largo del tiempo, no fue importante, de manera similar a lo observado por Messiga et al. (2010).

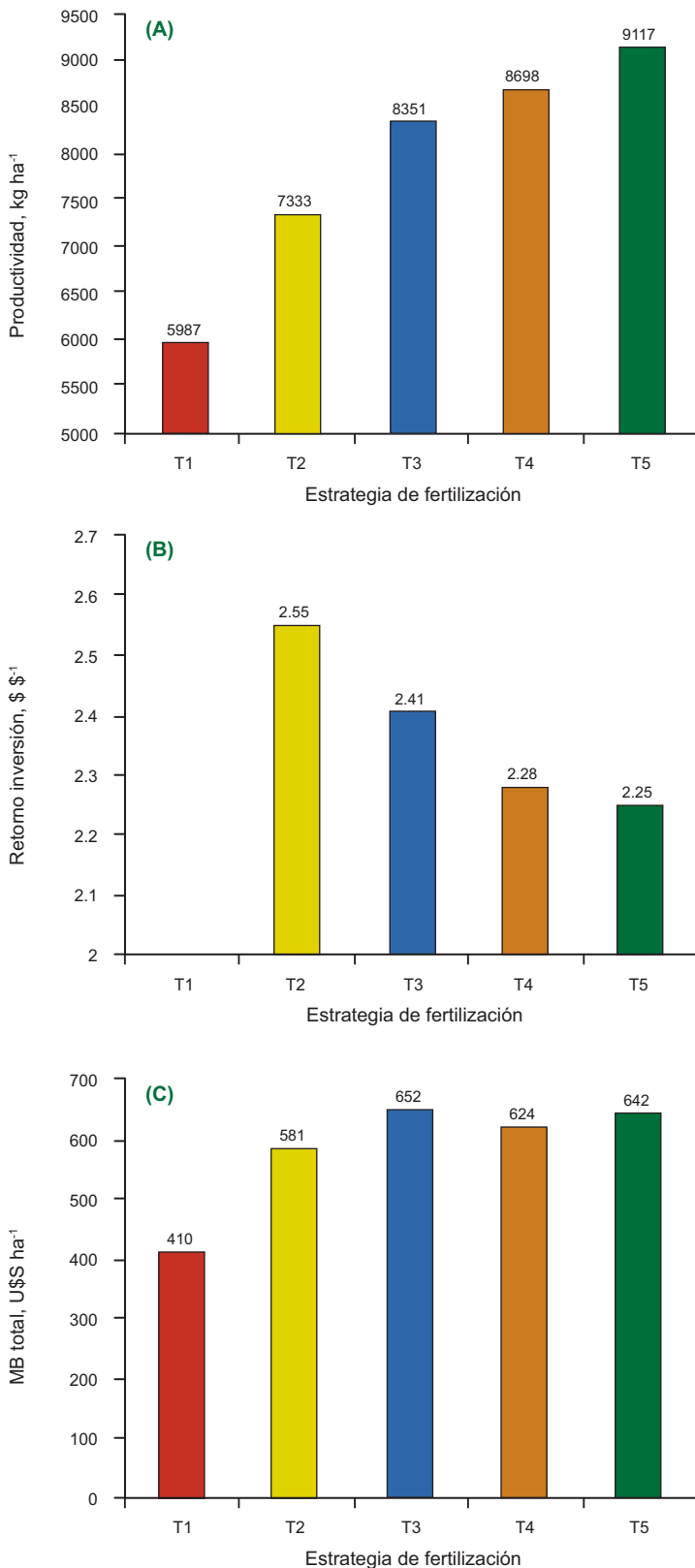
Para el análisis económico (Figura 6), los precios de los granos de trigo y maíz asignados son una referencia de los manejados en el norte de Buenos Aires en noviembre de 2011. Todas las estrategias de fertilización permitieron incrementar la productividad ( $\text{kg grano ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) (Figura 6A). Este incremento se tradujo en retornos positivos a la inversión en fertilizante, que decrecieron del T2 al T5 (Figura 6B). El margen bruto del cultivo alcanza el máximo en las estrategias T3, T4 y T5 (Figura 6C), sin considerar el valor económico que tiene esta última estrategia en términos de enriquecimiento en los niveles de P y S en el suelo. La diferencia de rendimientos entre T3, T4 y T5 es importante, no obstante ello no se traduce en términos de rentabilidad debido a que el cultivo que ha expresado las mayores diferencias de rendimiento (maíz) tiene un limitado peso relativo en la rentabilidad del sistema a causa de su desfavorable relación de precios con la soja.

### Consideraciones finales

Las estrategias de fertilización impactaron en los rendimientos de maíz, modificaron la concentración de N y P en grano y el balance de nutrientes en el suelo.

Las estrategias de fertilización no difirieron en MO, N total y pH luego de cinco años de evaluación, pero se registraron diferencias en P Bray (0-20 cm), y  $\text{S-SO}_4$  (0-20 y 20-40 cm).

Los cambios en los niveles de P Bray del suelo se relacionaron con el balance de P, existiendo una correlación entre balance y nivel final de P Bray del suelo al final de cada campaña. Luego de cinco años de experimentación, la tasa de cambio fue de  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  de



**Figura 6. Análisis económico de las estrategias de fertilización: A) Productividad anual (kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), B) Retorno a la inversión en fertilizante (\$ obtenido \$ invertido en fertilizante<sup>-1</sup>), y C) Margen Bruto (MB) global (U\$ ha<sup>-1</sup>) de la rotación según estrategia de fertilización. Precios de granos utilizados: Trigo \$ 480 t<sup>-1</sup>, Cebada \$ 600 t<sup>-1</sup>, Maíz \$ 510 t<sup>-1</sup>, y Soja \$ 1100 t<sup>-1</sup>. En todos los casos están descontados gastos de comercialización. Fertilizantes: Superfosfato triple de calcio U\$ 650 t<sup>-1</sup>, Urea granulada U\$ 650 t<sup>-1</sup> y Sulfato de calcio U\$ 260 t<sup>-1</sup>.**

P Bray (0-20 cm) por cada 8.5 kg ha<sup>-1</sup> de P como diferencia entre agregado y extracción del nutriente.

La diferencia en productividad neta entre estrategias se incrementa campaña tras campaña. Así, la diferencia entre la estrategia T5 y T1 alcanza luego de 7 cultivos en 5 años, un 52.2% a favor de T5.

El análisis económico de la rotación encontró que las estrategias de fertilización T3, T4 y T5 alcanzan los márgenes brutos más altos, y el retorno a la inversión en fertilizantes es máximo con T2, influenciado sobre todo por el precio de soja.

Las estrategias de fertilización T3, T4 y T5 permitieron alcanzar los MB más altos, mientras que el retorno a la inversión en fertilizantes fue máximo para T2, influenciado sobre todo por el precio de soja.

### Bibliografía

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

Ciampitti, I.A. 2009. Dinámica del fósforo del suelo en rotaciones agrícolas en ensayos de nutrición a largo plazo. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires. 116 p.

Ferraris, G.N., M. Toribio, R. Falconi, y L. Couretot. 2010. Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos, el balance de nutrientes y su disponibilidad en los suelos. Comisión 3. Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal. Actas CD XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 31 de Mayo al 5 de Junio. Rosario. Santa Fe.

Mallarino, A.P., y J. Prater. 2007. Corn and soybean grain yield, P removal, and soil-test responses to long-term phosphorus fertilization strategies. Proceeding 19th Annual Integrated Crop Management Conference. Ames. Iowa State University.

Messiga, A.J., N. Ziadi, D. Plenet, L.E. Parent, y C. Morel. 2010. Long-term changes in soil phosphorus status related to P budgets under maize monoculture and mineral P fertilization. *Soil Use and Management*. 26:354–364.★