

ANÁLISIS ECONÓMICO DEL MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN CON ENFOQUE EN EL LARGO PLAZO

ADRIÁN ALEJANDRO CORRENDO^{1*}; MIGUEL BOXLER² & FERNANDO OSCAR GARCÍA¹

Recibido: 26-05-15

Recibido con revisiones: 28-07-15

Aceptado: 01-08-15

RESUMEN

Los conceptos detrás de las mejores prácticas de manejo de la nutrición de cultivos incluyen tanto aspectos productivos, económicos, como sociales y ambientales. Todos ellos necesitan ser considerados en el proceso de desarrollo de las recomendaciones de fertilización. Este trabajo es un estudio de aspectos económicos referidos a la fertilización con N, P y S en maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.) y soja [*Glycine max* (L.) Merr.]. Para ello, se analizaron series de datos, entre las campañas 2000/01 a 2013/14, pertenecientes a cinco experimentos de fertilización de largo plazo situados en la región pampeana centro-norte de la Argentina. Los tratamientos consistieron de cuatro combinaciones de nutrientes (PS, NS, NP, y NPS) y un Testigo absoluto. Los indicadores económicos utilizados fueron la eficiencia agronómica parcial (EAP, kg grano kg nutriente aplicado⁻¹), el margen bruto parcial (MBP, US\$ ha⁻¹) y el retorno de la inversión (RI, US\$ US\$⁻¹). La disponibilidad de nutrientes en el suelo, la historia del lote, la rotación y el nivel de rendimiento de los cultivos determinaron respuestas, eficiencias y resultados económicos específicos para cada sitio. En general, las mayores ganancias acumuladas correspondieron al tratamiento NPS excepto en los casos con alto nivel inicial de P extractable, donde NS fue la mejor opción. Estos tratamientos generaron ganancias entre 77 (NS, RI=1,64) y 392 US\$ ha⁻¹ año⁻¹ (NPS, RI=2,38). En promedio, los nutrientes con mayor impacto económico acumulado fueron N (MBP=1365 US\$ ha⁻¹, RI=1,8) y S (MBP=1282 US\$ ha⁻¹, RI=4,6) respecto de la aplicación de P (MBP=642 US\$ ha⁻¹, RI=1,3). Sin embargo, la aplicación de P generó residualidad cuantificable como P extractable en el suelo valorizada entre +255 a +418 US\$ ha⁻¹. Bajo un enfoque de largo plazo, estos resultados destacan la rentabilidad de la fertilización bajo un criterio de reposición y enriquecimiento.

Palabras clave. Nutrición de cultivos; rotación; margen bruto; rentabilidad.

ECONOMIC ANALYSIS OF FERTILIZATION MANAGEMENT WITH FOCUS ON THE LONG TERM

ABSTRACT

Concepts behind the best management practices of crop nutrition include production, economics, as well as social and environmental aspects. All of these should be considered in the development process of fertilizer recommendations. This paper is a study of some of the economic aspects related to the N, P and S fertilization in corn (*Zea mays* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.) and soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] crops. For this purpose, a series of data, gathered from five on-farm experiments in the north-central pampas region of Argentina between cropping seasons 2000/01 and 2013/14 cropping seasons, were analyzed. Treatments consisted of four nutrient combinations (PS, NS, NP, and NPS) and a Check treatment. The economic performance indices were EAP (kg grain kg applied nutrient⁻¹), MBP (US\$ ha⁻¹) and RI (US\$ US\$⁻¹). The soil fertility level, cropping history, rotation and yield level determined site-specific responses, efficiencies and economic performances. The most profitable was the NPS treatment, except in cases with high initial soil P level, where the NS treatment was the best option. These treatments generated profits from 77 (NS, RI=1,64) to 392 US\$ ha⁻¹ y⁻¹ (NPS, RI=2,38). On average, nutrients with a larger cumulative economic impact were N (MBP=1365 US\$ ha⁻¹, RI=1,8), and S (MBP=1282 US\$ ha⁻¹, RI=4,6), compared to P fertilization (MBP=642 US\$ ha⁻¹, RI=1,3). However, P fertilization generated residual effects on the soil P level whose estimated value ranged from +255 to +418 US\$ ha⁻¹. Under a long term approach, these results highlight the profitability of fertilization management under a build-up and maintenance criterion.

Key words. Crop nutrition; rotation; income; profitability.

1 International Plant Nutrition Institute (IPNI), Argentina

2 CREA Sur de Santa Fe, Argentina

* Autor de contacto: correndo@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

La fertilización de los cultivos de grano ha adoptado en las dos últimas décadas una especial relevancia en los sistemas de producción de la región pampeana argentina, donde los principales cultivos son soja [*Glycine max* (L.) Merr.] y maíz (*Zea mays* L.) en verano, y trigo (*Triticum aestivum* L.) en invierno. Para las gramíneas -maíz y trigo-, las recomendaciones de fertilización normalmente incluyen nitrógeno (N) y fósforo (P), y más recientemente azufre (S). En el caso de la soja, las recomendaciones se basan principalmente en la nutrición fosforada y recientemente azufrada, pero generalmente las dosis utilizadas son menores respecto de las gramíneas (González Sanjuán *et al.*, 2013; Díaz-Zorita, 2015; Bolsa de Cereales, 2015).

Para facilitar la toma de decisiones, existen diferentes metodologías de diagnóstico mediante las cuales es posible estimar requerimientos, respuestas o probabilidad de respuesta a los nutrientes. Para todas ellas, la calibración local es una característica deseada para mejores recomendaciones. Sin embargo, la decisión de fertilización -tomada *ex-ante*- finalmente depende de aspectos económicos y financieros, donde las relaciones insumo:producto determinan una potencial rentabilidad de la práctica. En una instancia *ex-post*, normalmente se utilizan indicadores que estiman la eficiencia de uso de los nutrientes, siendo clásico el uso de la eficiencia agronómica ($\text{kg respuesta kg}^{-1}$ nutriente aplicado), dada su utilidad para realizar cálculos económicos (Calviño & Redolatti, 2004; Pagani *et al.*, 2008; Salvaggiotti *et al.*, 2011). Sin embargo, hay muy pocos antecedentes en la bibliografía donde se analice el desempeño económico de tratamientos de fertilización en ensayos de largo plazo (Schoeney, 1985; Zentner y Campbell, 1988; Ferraris *et al.*, 2015).

El uso de las herramientas de diagnóstico mencionadas constituye parte fundamental del desarrollo de las mejores prácticas de manejo (MPM) del uso de fertilizantes en función de características específicas de cada sitio (Bruulsema *et al.*, 2008). Las MPM de la nutrición de cultivos son estratégicas para incrementar la productividad del sistema de forma sustentable. Este concepto es complejo, y consiste tanto de dimensiones económicas, como sociales y ambientales, que necesitan ser incluidas en las recomendaciones de manejo (IPNI, 2013). En este trabajo, se analizan algunos aspectos de la dimensión económica referidos al manejo de la nutrición nitrogenada, fosforada y azufrada en maíz, trigo y soja en experimentos de fertilización de largo plazo en la región pampeana centro-norte de la Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Desde el año 2000, CREA Sur de Santa Fe, IPNI Cono Sur y Agroservicios Pampeanos SA (ASP) mantienen en conjunto la Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe que consiste en ensayos de nutrición de cultivos en campo de productores de la región pampeana centro-norte (García *et al.*, 2010). Esta red experimental se estableció con once ensayos bajo sistemas de siembra directa estabilizados, de los cuales en este trabajo se analizaron cinco sitios (Tabla 1). El período evaluado estuvo comprendido entre las campañas agrícolas 2000/01 y 2013/14 (14 campañas).

En cada sitio, con el objetivo de evaluar diferentes manejos y respuestas a la fertilización con N, P, y S, se disponen distintos tratamientos que se repiten de forma anual sobre las mismas parcelas (Tabla 2). Cada sitio solo cuenta con una de las dos rotaciones (Tabla 1). Las dosis de P y S se estiman en base a lo extraído por los cultivos más un 5-10% en concepto de reconstrucción de los nutrientes en suelo. En el caso de N, las dosis son aquellas relacionadas con los rendimientos máximos en redes experimentales de la Región CREA Sur de Santa Fe (Miguel Boxler *com. pers.*). La soja de primera no se fertiliza con N, mientras que la secuencia trigo/soja de segunda se maneja fertilizando a la siembra del trigo con dosis de P y S para ambos cultivos. Las fuentes de nutrientes son mezclas físicas compuestas por urea (46-0-0), fosfato monoamónico -FMA- (11-23-0), y yeso agrícola (0-0-0-16S) para N, P, y S, respectivamente, según corresponda para cada tratamiento. El aporte de N del FMA (11%N) se contabiliza, de manera que el tratamiento que no recibe P (NS) se fertiliza con una mezcla más rica en urea, equivalente al aporte de la fuente fosforada. Las mezclas de fertilizantes se aplican debajo y al costado de las semillas para evitar fitotoxicidad, incorporados a 5 cm de profundidad, en presiembrado o siembra de los cultivos de trigo, maíz, y soja de primera. El diseño experimental de los ensayos es en bloques completos aleatorizados (DBCA), con tres repeticiones. Mayor información sobre el manejo de los ensayos se encuentra disponible en García *et al.* (2010).

Determinaciones

Para el análisis económico se consideraron la eficiencia agronómica (EA) de uso de los nutrientes, el margen bruto (MB) de la fertilización (parcial y acumulado) y el retorno de la inversión (RI).

Eficiencia agronómica de uso de los nutrientes

La EA se estimó según la Ecuación 1:

$$EA = \Delta PG / DA \quad \text{Ecuación 1}$$

donde, EA ($\text{kg grano kg nutriente}^{-1}$) = eficiencia agronómica del nutriente; ΔPG (diferencia de producción de granos; kg grano ha^{-1}) = rendimiento sin limitaciones (NPS) - rendimiento con

Tabla 1. Características de los sitios evaluados y análisis de suelo inicial (2000/01, 0-20 cm). Red de Nutrición Región CREA Sur de Santa Fe.
Table 1. Main characteristics of the experiment sites and the initial soil test analysis (2000/01, 0-20 cm). Crop Nutrition Network of CREA Southern Santa Fe Region.

Establecimiento	Balducchi	San Alfredo	La Blanca	La Hansa ^a	Lambaré
CREA	Teodelina	Santa Isabel	Gral. Baldissera	Amstrong-Montes de Oca	San Jorge – Las Rosas
Subgrupo ^b	Hapludol típico	Argiudol típico	Hapludol típico	Argiudol ácuico	Argiudol típico
Serie de suelo	Santa Isabel	Hughes	La Bélgica	Bustinza	Los Cardos
Años de Agricultura	+ 60	15	6	+ 20	12
Rotación	Maíz-Trigo/Soja (M-T/Sj)		Maíz-Soja-Trigo/Soja (M-Sj-T/Sj)		
^c MO (g kg ⁻¹)	26	48	26	35	28
^d pH	5,9	6,0	6,6	5,6	5,7
^e Dap (g cm ⁻³)	1,40	1,41	1,31	1,25	1,21
^f P (mg kg ⁻¹)	11	12	16	45	68
^g S (mg kg ⁻¹)	8,9	7,0	9,2	7,6	13,7
^h Ca (cmol _{c+} kg ⁻¹)	8,1	11,0	7,2	7,6	9,9
^h Mg (cmol _{c+} kg ⁻¹)	2,0	2,1	2,0	1,6	3,0
^h K (cmol _{c+} kg ⁻¹)	1,4	1,7	1,9	1,7	2,6
ⁱ B (mg kg ⁻¹)	0,7	1,1	1,0	0,9	1,2
ⁱ Cu (mg kg ⁻¹)	1,3	0,9	1,3	1,4	2,0
ⁱ Fe (mg kg ⁻¹)	90	54	71	86	76
ⁱ Mn (mg kg ⁻¹)	46	28	36	54	98
ⁱ Zn (mg kg ⁻¹)	1,8	1,7	1,7	0,8	1,0

^aEl ensayo comenzó con soja de primera en la campaña 2001/02. ^bSoil Survey Staff (1975). ^cMateria orgánica (Nelson & Sommers, 1996). ^dpH 1:2.5 suelo:agua (Thomas, 1996). ^eDensidad aparente (Grossman & Reinsch, 2002). ^fFósforo extractable Bray-1 (Bray & Kurtz, 1945). ^gAzufre de sulfato (Johnson, 1987). ^hCalcio, magnesio y potasio intercambiables (Warncke & Brown, 1998). ⁱBoro extractable en agua caliente (Gupta, 1967). ^jCobre, hierro, manganeso y zinc extractables por DTPA (Gaines & Mitchel, 1979).

Tabla 2. Rangos de dosis de nutrientes aplicados a los cultivos de maíz, soja de primera y el doble cultivo trigo/soja de segunda en los cinco tratamientos establecidos. Campañas 2000/01 a 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, y Lambaré) y 2001/02 a 2013/14 (La Hansa). Red de Nutrición Región CREA Sur de Santa Fe.

Table 2. Nutrient rates in corn, soybean and the double-cropped wheat/soybean for the five fertilization treatments. Cropping seasons 2000/01 to 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, & Lambaré) and 2001/02 to 2013/14 (La Hansa). Crop Nutrition Network of CREA Southern Santa Fe Region.

Tratamiento	Testigo (T)	PS ^a	NS ^b	NP ^b	NPS ^b
----- Nutrientes (kg ha ⁻¹) -----					
Maíz					
N	-	10-19	92-157	92-157	92-157
P	-	20-40	-	20-40	20-40
S	-	19-24	19-24	-	19-24
Soja de primera					
N	-	14	-	14	14
P	-	30	-	30	30
S	-	18-24	18-24	-	18-24
Trigo/Soja de segunda					
N	-	18-22	82-103	82-103	82-103
P	-	37-46	-	37-46	37-46
S	-	20-24	20-24	-	20-24

^aLa dosis de N corresponde al aporte de la fuente fosforada (fosfato monoamónico, 11-23-0). ^bLa fertilización con urea (46-0-0) solo se realiza en los cultivos de maíz y trigo.

omisión de N, P ó S (PS, NS, y NP, respectivamente); DA (dosis de aplicación del nutriente; kg nutriente ha⁻¹) = aplicaciones de N, P ó S en el tratamiento NPS. Dado que el tratamiento PS recibió aporte de N de la fuente FMA (11%N), para el cálculo de las EAP_N, el denominador del cociente (DA) del cociente fue la diferencia de dosis entre los tratamientos NPS y NS.

La EA se consideró como eficiencia agronómica parcial (EAP). La respuesta obtenida en cada campaña, a partir de la segunda comienza a estar influenciada por la historia de cada parcela. En este sentido, el concepto de "eficiencia agronómica" comúnmente utilizado (kg de respuesta kg nutriente aplicado⁻¹) no sería aplicable en su forma pura. Similar al concepto de productividad parcial de factor (Cassman *et al.*, 1996a; 1996b), el término parcial de la eficiencia propone indicar que las respuestas no son el simple producto del fertilizante aplicado, sino también del ambiente de producción construido con las sucesivas fertilizaciones a lo largo de la rotación. Sin embargo, como se expresan en las mismas unidades (kg grano kg nutriente⁻¹), la EAP de cada nutriente, se compararon con las respectivas relaciones de precios promedio del período analizado. A modo de contar con valores de eficiencia comparables con las relaciones de precios para P y S, en el doble cultivo T/Sj se consideró, de manera arbitraria, un medio de las dosis (aplicada a la siembra trigo) para trigo y un medio para soja de segunda.

Margen bruto de la fertilización

En cada campaña se evaluó la diferencia de producción de granos (kg ha⁻¹) entre cada tratamiento fertilizado (PS, NS, NP y NPS) y el Testigo absoluto. A partir de dichos valores, se estimó el margen bruto parcial por fertilización (MBP, US\$ ha⁻¹) como la diferencia entre los ingresos adicionales y los costos de fertilización de cada tratamiento para los cultivos de maíz, soja de primera y el doble cultivo trigo/soja de segunda (Ecuación 2). Dado que el objetivo fue analizar la acumulación en el tiempo de esta variable para cada tratamiento, se calculó la suma del MBP de la campaña *n* más el MBP acumulado hasta la campaña previa (*n*-1).

$$\text{MBP} = [\Delta \text{Rendimiento} \times (\text{PrG} - \text{GC})] - [(\text{Fa} \times (\text{CF} + \text{Cop})) + \text{Ca}]$$

Ecuación 2

donde, MBP (US\$ ha⁻¹) = margen bruto parcial; Δ Rendimiento (kg ha⁻¹) = rendimiento de tratamientos fertilizados (PS, NS, NP y NPS) – rendimiento del Testigo; PrG (US\$ kg⁻¹) = precio del grano; GC (US\$ kg⁻¹) = gastos de comercialización; Fa (kg ha⁻¹) = fertilizante aplicado; CF (US\$ kg⁻¹) = costo del fertilizante; Cop (US\$ kg⁻¹) = costo de oportunidad del fertilizante; y Ca (US\$ ha⁻¹) = costo de aplicación del fertilizante.

Retorno de la inversión

Al cierre de la campaña 2013/14 se calculó un índice de retorno de la inversión (RI) (FAO-IFA, 2002) como el cociente

entre los ingresos adicionales respecto del Testigo y los costos de fertilización acumulados de cada tratamiento fertilizado (Ecuación 3). Al igual que para las estimaciones de MBP, la secuencia T/Sj se consideró como un solo cultivo.

$$\text{RI} = \Delta \text{Ingresos acumulados} / \text{Costos acumulados}$$

Ecuación 3

donde, RI (US\$ US\$⁻¹) = retorno de inversión; Δ Ingresos acumulados (US\$ ha⁻¹) = \sum ingresos de tratamientos fertilizados respecto del Testigo; Costos acumulados (US\$ ha⁻¹) = \sum costos de tratamientos fertilizados.

En todos los casos, con el objeto de contemplar las variaciones en las relaciones grano:fertilizante y el valor monetario, los precios utilizados fueron los correspondientes a la serie histórica entre las campañas 2000/01 a 2013/14, expresados en US\$ constantes al 31 de diciembre de 2013 (INDEC, 2014; IMF, 2014). Las series se elaboraron en base a las cotizaciones de maíz, trigo y soja "Rosario disponible", y de los fertilizantes (urea, fosfato monoamónico y sulfato de calcio) (Agromercado, 2014; Márgenes Agropecuarios, 2014). El precio de los granos se ajustó descontando gastos de comercialización (fletes corto y largo a Rosario, secado, acopio, paritaria, zarandeo, impuestos y sellado), y al costo del fertilizante se adicionó un interés por inmovilización igual a la tasa vigente por depósito en plazo fijo (BCRA, 2014) más el costo de aplicación.

Con el objetivo de comparar las EAP entre sitios y respecto de sus relaciones de precios, se estudió la variable eficiencia (kg de grano kg nutriente⁻¹) para cada combinación de nutriente*cultivo. Se utilizó un modelo mixto donde las fuentes de variación fueron el sitio como efecto fijo y la campaña (factor de bloqueo) como efecto aleatorio. La producción acumulada de granos (total y de cada cultivo), y el RI se estudiaron dentro de cada rotación, mediante un modelo mixto donde sitio, tratamiento de fertilización, y su interacción fueron considerados como efectos fijos, y el bloque como efecto aleatorio. En el caso del MBP acumulado, el modelo incluyó el factor campaña como efecto fijo y una estructura de medidas repetidas en el tiempo. Para la elección de los modelos más parsimoniosos se emplearon los criterios de información de Akaike (AIC) y Bayesiano (BIC). Los supuestos de normalidad y homocedasticidad de las variables se evaluaron de manera gráfica y según las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Las comparaciones se realizaron mediante contrastes y comparaciones múltiples de efectos significativos ajustadas según Tukey ($\alpha=0,05$). Los análisis estadísticos se realizaron mediante el software Infostat versión 2013 (Di Rienzo *et al.*, 2013) y el paquete *nlme* (Pinheiro *et al.*, 2015) del entorno estadístico R-CRAN (Hornik, 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Producción de granos

La producción acumulada de granos de maíz, trigo y soja, para ambas rotaciones (M-T/Sj; M-Sj-T/Sj), registró variaciones significativas en función del sitio ($p=0,0007$; $p<0,0001$) y el tratamiento de fertilización ($p<0,0001$; $p<0,0001$), e interacción sitio*tratamiento ($p=0,0027$; $p<0,0001$). En todos los sitios, los mayores niveles de producción se alcanzaron con el tratamiento sin limitaciones de nutrientes (NPS) y los más bajos con el Testigo. En general, los cultivos de maíz y trigo fueron los que más respuesta relativa a la fertilización registraron para N y P; mientras que los cultivos de soja de primera y de segunda, manifestaron las mayores respuestas a S (Fig. 1). Las variaciones entre sitios en cuanto a las respuestas, se relacionaron a la disponibilidad de nutrientes en el suelo, la rotación, la historia del lote y el nivel de rendimiento de los cultivos (datos no mostrados; García *et al.*, 2010).

En ambas rotaciones, los niveles más altos de producción y las menores respuestas a fertilización, se lograron en los sitios que presentaron mejores condiciones de fertilidad: San Alfredo (91,1 a 143,1 t ha⁻¹) y Lambaré (88,6 a 115,5 t ha⁻¹). En contraste, los efectos más notorios por

omisión de N, P y/o S, se observaron en los sitios de menor fertilidad: Balducchi (M-T/Sj), donde el Testigo registró una producción acumulada de 57,7 t ha⁻¹ y el tratamiento NPS 129,9 t ha⁻¹ (+125%); y La Hansa (M-Sj-T/Sj) donde el Testigo registró una producción acumulada de 54,2 t ha⁻¹ y el tratamiento NPS 96,0 t ha⁻¹ (+73%). Este comportamiento diferencial entre sitios, se refleja en la historia agrícola previa y a las condiciones de fertilidad general de cada sitio (Tabla 1), así como también en trabajos complementarios que evaluaron variables de calidad del suelo relacionadas a las condiciones físicas y biológicas de los sitios (Ferreras *et al.*, 2007; Conforto *et al.*, 2010; Grümberg, *et al.*, 2010; Ferreras *et al.*, 2013; Verdenelli *et al.*, 2015).

Bajo rotación M-T/Sj, las mayores diferencias comparativas en producción de granos entre sitios se registraron en la producción del tratamiento Testigo. En Balducchi, la producción total de granos sin fertilización (57,7 t ha⁻¹) fue menor ($p<0,05$) respecto de San Alfredo (91,1 t ha⁻¹), dada su condición de menor fertilidad inicial (Fig. 1, Tabla 1). Por otro lado, en Balducchi los cultivos de maíz y trigo respondieron en la misma magnitud a la falta de N (-40%); mientras que trigo y soja de segunda fueron los cultivos que más evidenciaron la falta de P (-32%) y S (-30%), respectivamente. En San Alfredo, el cultivo de trigo fue el que más

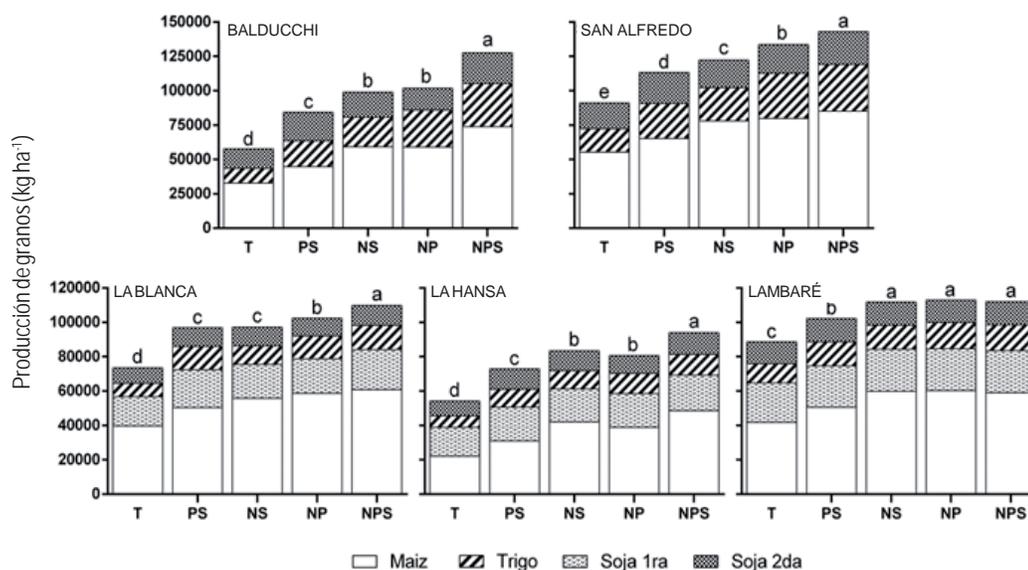


Figura 1. Producción acumulada de granos para los diferentes tratamientos de fertilización en los cinco sitios evaluados. Campañas 2000/01 a 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, y Lambaré) y 2001/02 a 2013/14 (La Hansa). Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Letras distintas indican diferencias significativas de producción total entre tratamientos dentro de un mismo sitio (Tukey, 5%).

Figure 1. Cumulative grain production under the five fertilization treatments at the five experiment sites. Cropping seasons 2000/01 to 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, & Lambaré) and 2001/02 to 2013/14 (La Hansa). Crop Nutrition Network of CREA Southern Santa Fe Region. Different letters indicate significant differences for total production between treatments within the same site (Tukey, 5%).

respondió en producción tanto por fertilización nitrogenada (-26%) como fosforada (-29%); mientras que soja de segunda fue el cultivo que manifestó en mayor medida la falta de S (-13%).

Bajo rotación M-Sj-T/Sj, la producción de granos sin limitaciones (NPS) fue similar para los cuatro cultivos en los tres sitios. Cabe destacar que la menor producción acumulada del sitio La Hansa se atribuye principalmente a que el sitio cuenta con un cultivo de maíz menos dado que el ensayo comenzó en la campaña 2001/02 con el cultivo de soja de primera (Fig. 1). La producción de granos acumulada en el Testigo fue mayor en Lambaré respecto de los demás sitios ($p < 0,05$), reflejando su mejor condición de fertilidad inicial debida, en parte, a su historia agrícola más reciente que además incluía rotación con pasturas. Por otra parte, en La Blanca, los nutrientes más limitantes fueron N en maíz (-17%), P en trigo (-23%) y S en soja de primera (-14%). En La Hansa, el cultivo más limitado por nutrición fue maíz por omisión de N (-36%), S (-20%) y P (-13%). En Lambaré, la principal limitante se observó en maíz por omisión de N (-14%), mientras que, en menor medida, la omisión de P afectó principalmente a trigo (-6%), y la falta de S a soja de segunda (-3%).

Eficiencia agronómica parcial de los nutrientes

A pesar de la influencia de la historia de cada parcela sobre las respuestas a la fertilización, no se observó un crecimiento de las EAP con el paso de las campañas (datos no mostrados). Sin embargo, las eficiencias estimadas registraron importante variabilidad a través de los años (Fig. 2). En este sentido, para los mismos sitios, se demostró la influencia de variables relacionadas a la economía del agua de cada campaña tanto sobre la respuesta a nutrientes como el rendimiento sin limitaciones nutricionales (Correndo *et al.*, 2012). En trigo, las respuestas a la fertilización nitrogenada se incrementaron con el agua a la siembra cuando el antecesor fue maíz, y disminuyeron marcadamente cuando las precipitaciones del mes de Octubre fueron mayores a 100 mm. Las respuestas a P se redujeron con las precipitaciones durante el ciclo del cultivo y se asociaron en forma positiva con el agua almacenada en el suelo en anéstris. En soja de primera, las respuestas a P y S, combinados o por separado, fueron mayores en situaciones de menor oferta hídrica durante el ciclo de cultivo. En contraste, en maíz y soja de segunda no se encontraron asociaciones entre la respuesta a nutrientes y variables relacionadas a la oferta de agua.

Para el cultivo de maíz, las EAP_N fueron superiores ($p < 0,05$) a la relación media de precios en los sitios Balducchi (35,1 kg maíz kg N⁻¹), San Alfredo (24,4 kg maíz kg N⁻¹) y La Hansa (39,3 kg maíz kg N⁻¹); y fueron levemente mayores pero no alcanzaron a diferenciarse (al 5%, $p = 0,065$) de la relación de precios en La Blanca (17,2 kg maíz kg N⁻¹) y Lambaré (15,2 kg maíz kg N⁻¹). Por su parte, las EAP_P resultaron bastante variables según la campaña y las medias no se diferenciaron ($p > 0,05$) de las relaciones de precios promedio (29,2 kg maíz kg P⁻¹) en los sitios Balducchi (57,6 kg maíz kg P⁻¹), San Alfredo (32,4 kg maíz kg P⁻¹), La Hansa (44,4 kg maíz kg P⁻¹) y La Blanca (27,8 kg maíz kg P⁻¹); mientras que solo resultaron no económicas en el sitio Lambaré (-3,4 kg maíz kg P⁻¹). Por su parte, las EAP_S fueron superiores ($p < 0,05$) a la relación media de precios en los sitios Balducchi (107,1 kg maíz kg S⁻¹), San Alfredo (38,9 kg maíz kg S⁻¹) y La Hansa (142,3 kg maíz kg S⁻¹); mientras que en La Blanca y Lambaré, la eficiencia no se diferenció ($p > 0,05$) de la relación media de precios (13,7 kg maíz kg S⁻¹).

En el sitio Lambaré, con una alta fertilidad inicial (Tabla 1), se registraron las menores eficiencias medias para los tres nutrientes en maíz; mientras que los niveles más altos de eficiencia en maíz se registraron en los sitios Balducchi (M-T/Sj), y La Hansa (M-Sj-T/Sj). Ambos sitios resultaron los de historia agrícola más prolongada (Tabla 1) y en general registraron los más bajos niveles de N-nitrato (0-60 cm) a la siembra de maíz (datos no mostrados) lo que explicaría las mayores EAP_N . Para el caso de P, Balducchi registró los niveles más bajos de P_{Bray-1} (0-20 cm) desde el inicio (Tabla 1), mientras que La Hansa comenzó en niveles altos pero que disminuyeron marcadamente hacia las últimas campañas debido a la omisión del nutriente (Boxler *et al.*, 2015). No se observó correspondencia con la EAP_S y el nivel de S-sulfato en el suelo (García *et al.*, 2010).

Para el cultivo de trigo, en ambos sitios con antecesor maíz (Balducchi y San Alfredo) se registraron EAP_N medias de 21,7 y 17,3 kg trigo kg N⁻¹, respectivamente, superiores ($p = 0,0001$) a la relación media de precios (7,9 kg trigo kg N⁻¹). En contraste, en ninguno de los sitios con antecesor soja (La Hansa, La Blanca y Lambaré) las EAP_N superaron la relación de precios ($p = 0,15$). En estos sitios, probablemente el cultivo antecesor soja de primera aportó una cantidad significativa de N durante el ciclo del trigo que redujo el potencial de respuesta a N (Echeverría *et al.*, 1992). En el caso de P, la tendencia fue de observar mayores EAP_P en los sitios con menor nivel de P_{Bray-1} inicial (0-20 cm). Las EAP_P medias en Balducchi (58,7 kg trigo kg P⁻¹) y San Alfredo

(53,5 kg trigo kg P⁻¹), fumayores ($p < 0,05$) a la relación de precios media (26,5 kg trigo kg P⁻¹); en La Blanca (39,0 kg trigo kg P⁻¹) la eficiencia no se diferenció de dicha relación; mientras que fueron inferiores a la relación media de precios en La Hansa y Lambaré, los sitios con mayor fertilidad fosforada (Tabla 1). En el caso de la aplicación de S en trigo, las EAP_s fueron superiores ($p < 0,05$) a la relación de precios (9,5 kg trigo kg S⁻¹) en dos de los cinco sitios: Balducchi (41,7 kg trigo kg S⁻¹) y La Blanca (21,0 kg trigo kg S⁻¹), sin embargo la variación de dicha eficiencia no se relacionó con los niveles de S en el suelo a distintas profundidades (García *et al.*, 2010).

En soja de primera, la mayor EAP_p se registró en el sitio La Blanca (23,3 kg soja kg P⁻¹), seguido de La Hansa (9,4 kg soja kg P⁻¹), cuya eficiencia media no se diferenció de la media de la relación de precios ($p > 0,05$); mientras que Lambaré fue el único sitio que registró una eficiencia media menor (0,6 kg soja kg P⁻¹) a la relación de precios ($p = 0,0001$), relacionado a su alto nivel de fertilidad de P (Tabla 1). En cuanto a S, el sitio La Blanca también registró mayores EAP_s (34,7

kg soja kg S⁻¹) respecto de los sitios La Hansa (11,6 kg soja kg S⁻¹), y especialmente Lambaré (2,1 kg soja kg S⁻¹) -el sitio con más alto nivel inicial S (Tabla 1)-, cuya eficiencia media no se diferenció ($p > 0,05$) de la relación de precios del período (6,2 kg soja kg S⁻¹). En soja de segunda, la EAP_p solo resultó mayor a la relación de precios media (13,2 kg soja kg S⁻¹) en los sitios con rotación M-T/Sj ($p < 0,05$): Balducchi (27,3 kg soja kg P⁻¹) y San Alfredo (28,7 kg soja kg P⁻¹). Por otra parte la EAP_s fue superior a la relación de precios (6,2 kg soja kg S⁻¹) en todos los sitios excepto en Lambaré ($p < 0,05$) donde, sin embargo, la eficiencia resultó similar (6,1 kg soja kg S⁻¹). Estos resultados coinciden con experiencias previas donde la EA en soja tiende a ser mayor cuando el nivel de fertilidad fosforada o azufrada del suelo es menor (Calviño & Redolatti, 2004; Ferraris *et al.*, 2004; Gutiérrez Boem & Salvagiotti, 2014).

Margen bruto parcial por fertilización

Durante el período analizado, las relaciones de precios registraron altibajos que generaron momentos más y menos

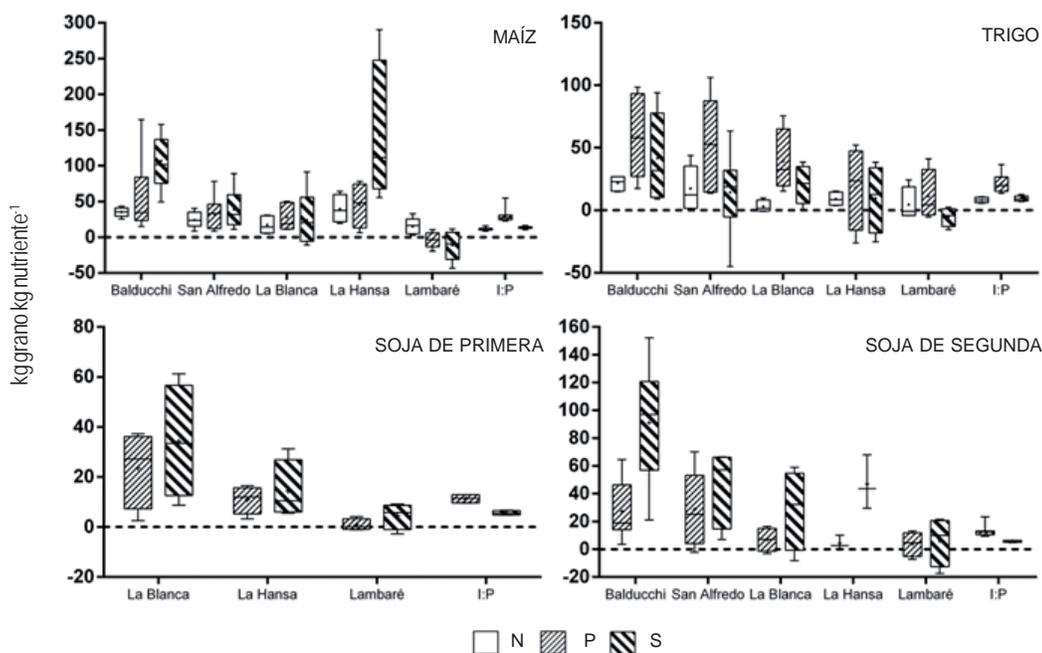


Figura 2. Eficiencia agronómica parcial (EAP, kg grano kg nutriente⁻¹) de nitrógeno (N), fósforo (P), y azufre (S) para maíz, trigo, soja de primera y soja de segunda dentro de cada sitio; y relaciones insumo:producto (I:P) en las mismas campañas de cada cultivo. Las cajas indican los percentiles 25 y 75, las cruces indican la media, las líneas horizontales indican la mediana, y las barras verticales los valores extremos. Campañas 2000/01 a 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, y Lambaré) y 2001/02 a 2013/14 (La Hansa). Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe.

Figure 2. Partial agronomic efficiency (EAP, kg grain kg applied nutrient⁻¹) of nitrogen (N), phosphorus (P), and sulfur (S) for corn, wheat, soybean, and double cropped soybean for each site, and the price ratios (I:P) in the same cropping seasons. Boxes indicate 25, and 75 percentiles, + indicate averages, horizontal lines indicate median, and bars indicate extreme values. Cropping seasons 2000/01 to 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, & Lambaré) and 2001/02 to 2013/14 (La Hansa). Crop Nutrition Network of CREA Southern Santa Fe Region.

favorables para la inversión en fertilizantes (Fig. 3). Las relaciones de precios (kg grano para comprar 1 kg de nutriente) de los granos con N, P y S variaron 29%, 37%, y 24% para trigo, y 22%, 34%, y 13% para maíz. Por su parte, para soja variaron 39% y 21% para P y S, respectivamente. Estas variaciones, mayores para el caso de P, se relacionan principalmente con el alza de precios de los fertilizantes debida a la crisis financiera internacional de 2008-2009, que se normalizó en las campañas siguientes.

La inversión total realizada en fertilizantes en las 14 campañas según las diferentes estrategias de fertilización fue de: 2094, 2374, 3579 y 3965 US\$ ha⁻¹ para los tratamientos PS, NS, NP y NPS, respectivamente, en los sitios con rotación M-T/Sj (Balducchi y San Alfredo); y de 1920, 1694, 2761 y 3129 US\$ ha⁻¹ para los tratamientos PS, NS, NP y NPS, respectivamente, en los sitios bajo rotación M-Sj-T/Sj (La Blanca, La Hansa y Lambaré). El resultado de esta inversión, evaluado como MBP anual, varió entre -255 y 1202 US\$ ha⁻¹ año⁻¹, según cultivo, tratamiento, sitio, y precios de granos y fertilizantes de cada campaña (Fig. 4).

En los sitios bajo rotación M-T/Sj, los MBP obtenidos en maíz y el doble cultivo trigo/soja de segunda, generalmente resultaron similares entre sitios, y el tratamiento NPS fue el de mejor comportamiento. En el global de los años, el segundo mejor tratamiento para maíz fue NS, y para el doble cultivo T/Sj fue PS (Fig. 4). Estas diferencias entre maíz

y el doble cultivo, respectivamente, indican por un lado el mayor potencial de respuesta a N del maíz y a P del doble cultivo, y por otro, la importancia del S para ambos cultivos. Para los sitios en rotación M-Sj-T/Sj, en general, el maíz fue el cultivo con mayores MBP, a excepción de La Blanca, donde la soja de primera generó mejores resultados en las últimas campañas. En este sitio, la tendencia de MBP crecientes en soja de primera es la más notoria entre todos los sitios (datos no mostrados).

Adicionalmente, se observó que aquellos tratamientos donde las gramíneas de la rotación recibieron N (NPS) registraron mayores rendimientos, y por tanto, mayores MBP en soja de primera (La Blanca y La Hansa) y soja de segunda (Balducchi y San Alfredo) respecto del tratamiento sin N en las gramíneas previas (PS) (Fig. 4). Estos resultados podrían ser explicados, en parte, por un mayor volumen y calidad de rastrojo producido con el tratamiento NPS. Por un lado, durante las primeras etapas del cultivo de soja, más biomasa podría inmovilizar más N y transferirlo hacia etapas más avanzadas; que por otro lado, también aportaría más N para cubrir parte de la demanda del cultivo que la fijación simbiótica no alcanza a cubrir (Salvagiotti *et al.*, 2008; Collino *et al.*, 2015).

De un total de 276 sitios*campaña que recibieron fertilización, en un 74% de los casos se obtuvo ganancia. La frecuencia media de MBP positivos fue de 71%, 78%, 67%

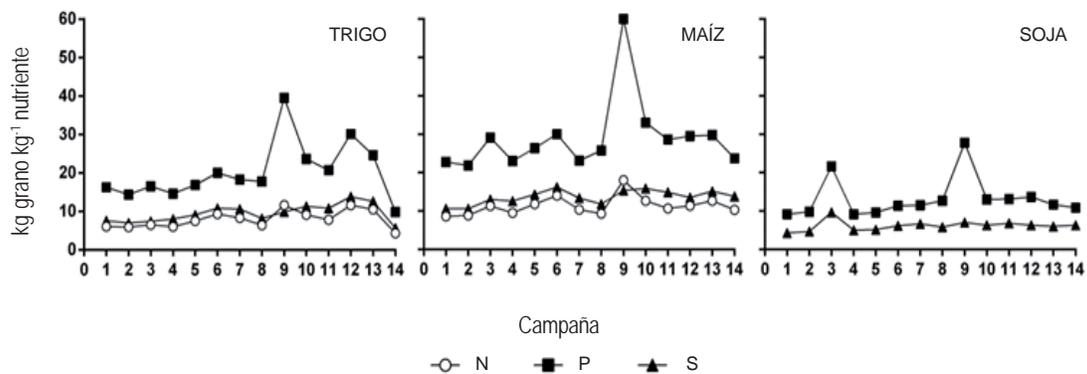


Figura 3. Serie histórica de las relaciones de precios (kg grano kg⁻¹ nutriente) registradas entre las campañas 2000/01 (1) y 2013/14 (14) para trigo, maíz y soja. Las fuentes consideradas fueron: urea para N, fosfato monoamónico para P, y sulfato de calcio para S. Las relaciones de precios promedio del período fueron: 7,9, 20,2 y 9,5 kg de trigo por kg de N, P y S, respectivamente; 11,4, 29,2 y 13,7 kg de maíz por kg de N, P y S, respectivamente; y 13,2 y 6,2 kg de soja por kg de P y S, respectivamente. Fuente: elaboración propia en base a datos publicados por Agromercado (2014) y Márgenes Agropecuarios (2014).

Figure 3. Series of price ratios (kg grain kg⁻¹ nutrient⁻¹) registered between cropping seasons 2000/01(1) to 2013/14 (14) for wheat, corn and soybean. Nutrient sources were: urea-N, monoammonum phosphate-P, and gypsum-S. Average ratios were: 7,9, 20,2, and 9,5 kg wheat kg⁻¹ N, P and S, respectively; 11,4, 29,2, and 13,7 kg corn kg⁻¹ de N, P and S, respectively; and 13,2, and 6,2 kg soybean kg⁻¹ P and S, respectively. Source: self-made based on published data from Agromercado (2014) and Márgenes Agropecuarios (2014).

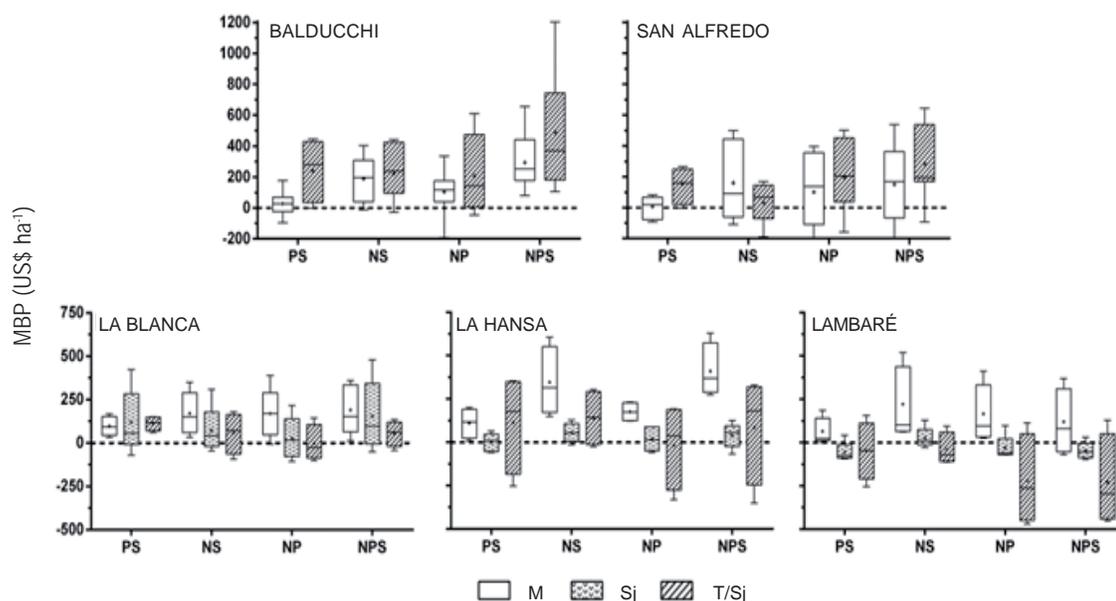


Figura 4. Margen bruto parcial (MBP, US\$ ha⁻¹) de los diferentes tratamientos de fertilización respecto del testigo no fertilizado (línea punteada en cero) para maíz (M), soja de primera (Sj), y trigo/soja de segunda (T/Sj) en los cinco sitios evaluados. Las cajas indican los percentiles 25, 50 y 75, las cruces indican la media, y las barras verticales los valores extremos. Campañas 2000/01 a 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, y Lambaré) y 2001/02 a 2013/14 (La Hansa). Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe.

Figure 4. Partial benefits (MBP, US\$ ha⁻¹) of fertilized treatments compared to Check (horizontal dotted line) for maize (M), soybean (Sj), and double cropped wheat/soybean (T/Sj) at the five experiment sites. Boxes indicate 25, 50, and 75 percentiles, + indicate averages, and whiskers indicate the extreme values. Cropping seasons 2000/01 to 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, & Lambaré) and 2001/02 to 2013/14 (La Hansa). Crop Nutrition Network of CREA Southern Santa Fe Region.

y 74%, para los tratamientos PS, NS, NP y NPS, respectivamente. En ambas rotaciones, la frecuencia de MBP positivos fue superior en los sitios de menor fertilidad respecto de aquellos más fértiles. Bajo rotación M-T/Sj, la fertilización NPS en Balducchi generó MBP positivos en el 100% de los casos, mientras que en San Alfredo la frecuencia fue del 71%. Por otra parte, bajo rotación M-Sj-T/Sj, en La Hansa y La Blanca, el 77% y 79% de los casos fertilizados con NPS lograron MBP positivos, mientras que en Lambaré la frecuencia fue del 29% de los casos (Fig.5).

Por otra parte, la acumulación de beneficios económicos a lo largo de las campañas, registró alta correlación (ρ) entre medidas repetidas en el tiempo en ambas rotaciones (M-T/Sj, $\rho = 0,97$; M-T/Sj, $\rho = 0,96$) según una estructura de covarianza auto-rregresiva de primer orden. En ambas rotaciones (M-T/Sj; M-Sj-T/Sj), se registraron efectos significativos de sitio ($p=0,0125$; $p=0,025$), tratamiento ($p<0,0001$; $p=0,0036$), y campaña ($p<0,0001$; $p<0,0001$), interacción sitio*tratamiento -en M-Sj-T/Sj- ($p=0,1025$; $p=0,0169$), sitio*campaña ($p<0,0001$; $p<0,0001$),

tratamiento*campaña ($p<0,0001$; $p<0,0001$), e interacción sitio*tratamiento*campaña ($p<0,0001$; $p<0,0001$).

Luego de catorce campañas agrícolas, los mayores MBP acumulados por fertilización se registraron en los sitios bajo rotación M-T/Sj (Fig. 6), principalmente debido a la mayor proporción de maíz y menor de soja respecto de la rotación M-Sj-T/Sj, que fueron los cultivos que más y menos respondieron a la fertilización; y que más y menos inversión en fertilizantes registraron, respectivamente. En el sitio Balducchi (con mayor historia de agricultura continua), los márgenes acumulados fueron de 1849, 2873, 2162 y 5484 US\$ ha⁻¹ para los tratamientos PS, NS, NP y NPS, respectivamente. Para los mismos tratamientos, los márgenes acumulados en San Alfredo fueron de 1127, 1345, 2079 y 3042 US\$ ha⁻¹, respectivamente. En Balducchi, el margen por fertilización comenzó a diferenciarse entre tratamientos a partir de la segunda campaña, a partir de la sexta, el beneficio acumulado del manejo NPS comenzó a ser notoriamente superior al resto. En San Alfredo, comenzaron a registrarse diferencias significativas a partir de la sexta

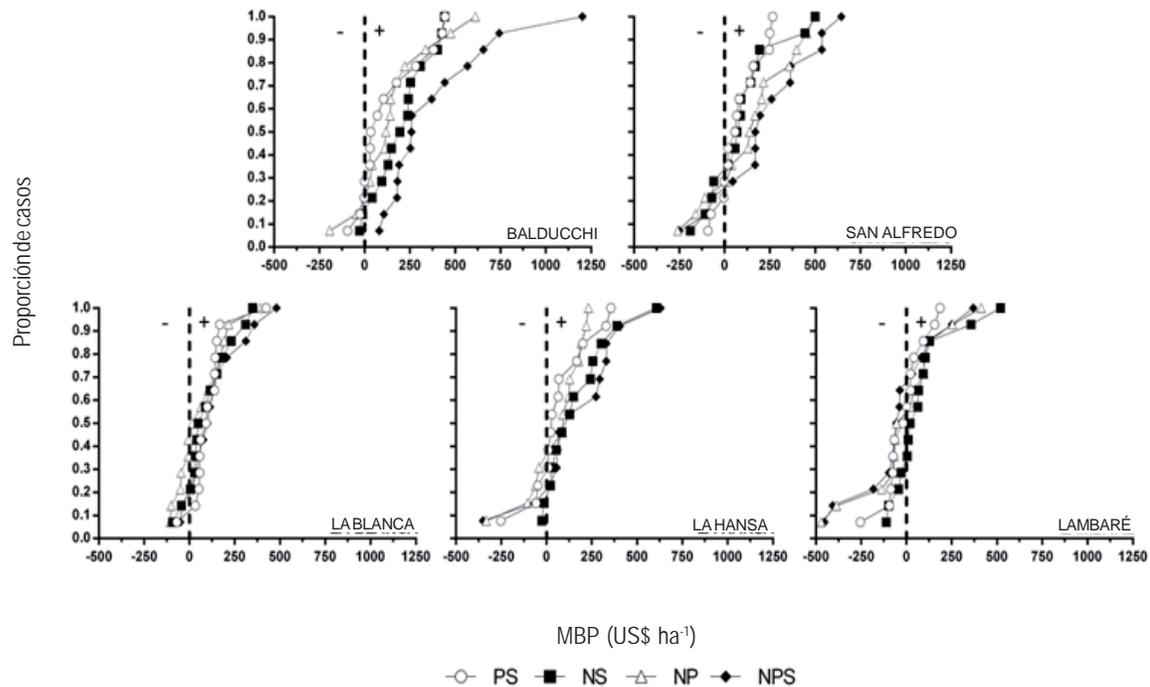


Figura 5. Distribución observada de margen bruto parcial (MBP, US\$ ha⁻¹) respecto del testigo no fertilizado (línea vertical punteada en cero) para los diferentes tratamientos de fertilización en los cinco sitios evaluados Campañas 2000/01 a 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, y Lambaré) y 2001/02 a 2013/14 (La Hansa). Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe.

Figure 5. Observed distribution of partial benefits (MBP, US\$ ha⁻¹) of fertilized treatments compared to Check (vertical dotted line) at the five experiment sites. Cropping seasons 2000/01 to 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, & Lambaré) and 2001/02 to 2013/14 (La Hansa). Crop Nutrition Network of CREA Southern Santa Fe Region.

cosecha y, desde la octava campaña, el tratamiento NPS fue claramente superior al resto.

Los sitios bajo rotación M-Sj-T/Sj, presentaron márgenes por fertilización relativamente menores respecto de la rotación M-T/Sj (Fig. 6). El sitio La Blanca registró márgenes acumulados por 1540, 1443, 978, y 1937 US\$ ha⁻¹ para PS, NS, NP y NPS, respectivamente. Para los mismos tratamientos, en La Hansa (con una campaña menos) se obtuvieron beneficios por 894, 2221, 725 y 2173 US\$ ha⁻¹, y en Lambaré los márgenes fueron de -149, 1081, -211 y -559 US\$ ha⁻¹, respectivamente. En estos dos últimos sitios, el tratamiento NS registró los mejores MBP dada la baja respuesta a la fertilización fosfatada causa de los altos niveles de P en el suelo. En La Hansa, el tratamiento NS obtuvo MBP muy similares a NPS desde la tercera campaña. Por otro lado, en Lambaré todos los tratamientos comenzaron a generar MBP positivos a partir de la décima campaña -acusando agotamiento de fertilidad-, pero el

tratamiento NS resultó el único con MBP acumulado positivo al final del período evaluado.

La decisión de adoptar una práctica de manejo, en este caso la fertilización, se asocia a un riesgo de pérdida así como la decisión contraria a un riesgo de ganancia no percibida, o lucro cesante. Los MBP acumulados de los tratamientos más redituables en cada sitio indican que, respecto de un manejo sin fertilización (Testigo) en el período evaluado el productor registraría lucros cesantes por 392, 217, 138, 171, y 77 US\$ ha⁻¹ año⁻¹ en Balducchi, San Alfredo, La Blanca, La Hansa, y Lambaré, respectivamente; además de degradar progresivamente la calidad del suelo (Ferrerías *et al.*, 2007; Conforto *et al.*, 2010; García *et al.*, 2010; Grümberg *et al.*, 2010; Ferrerías *et al.*, 2013; Boxler *et al.*, 2015; Verdenelli *et al.*, 2015). En este sentido, las MPM de la nutrición de cultivos -como, por ejemplo, el uso del análisis de suelos como herramienta de diagnóstico para mantener una fertilización balanceada- aportan a disminuir tanto el riesgo de pérdida como el de lucro cesante.

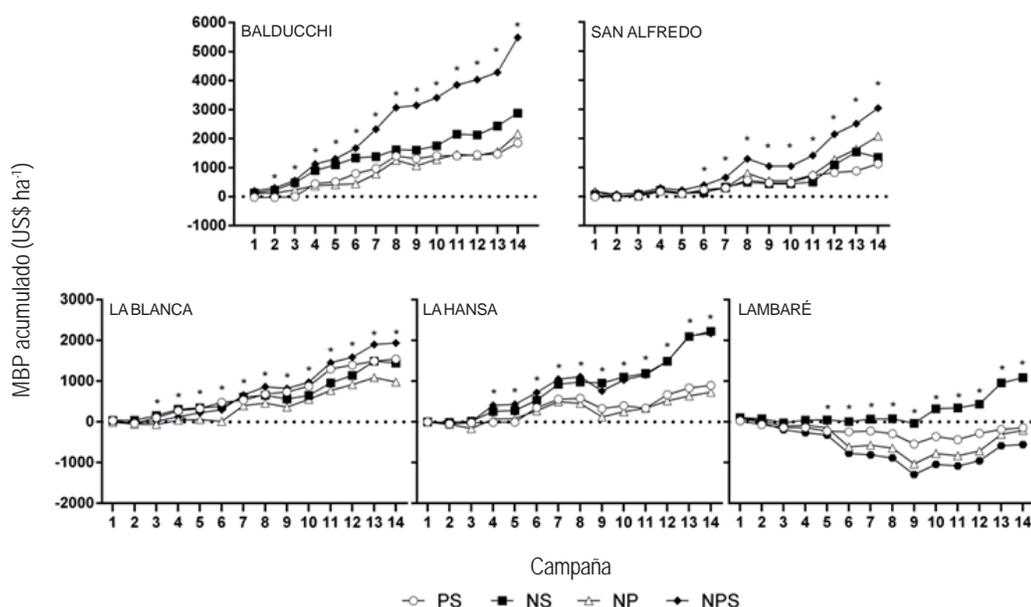


Figura 6. Margen bruto parcial (MBP) acumulado (US\$ ha⁻¹) respecto del testigo no fertilizado (línea horizontal punteada en cero) para los diferentes tratamientos de fertilización en los cinco sitios evaluados. Campaños 2000/01 a 2013/14. Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Asteriscos (*) indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de un mismo sitio y campaña (Tukey, 5%).

Figure 6. Cumulative partial benefits (MBP, US\$ ha⁻¹) of fertilized treatments compared to Check (horizontal dotted line) at the five experiment sites. Cropping seasons 2000/01 to 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, & Lambaré) and 2001/02 to 2013/14 (La Hansa). Crop Nutrition Network of CREA Southern Santa Fe Region. Asterisks (*) indicate significant differences between treatments within the same site and cropping season (Tukey, 5%).

En general, a nivel de nutrientes, N y S tuvieron un mayor impacto relativo sobre el MBP acumulado respecto de la aplicación de P (Tabla 3). Mientras Balducchi y San Alfredo (M-T/Sj) manifestaron mayor respuesta económica a la fertilización con N; La Blanca, La Hansa y Lambaré (M-Sj-T/Sj) manifestaron mayor impacto económico por la fertilización con S. En el primer caso, el mayor impacto de N puede relacionarse a la mayor presencia de gramíneas en la rotación M-T/Sj. En el segundo, la mayor respuesta económica a S puede estar relacionada a la mayor proporción de soja en la rotación M-Sj-T/Sj (Martínez y Cordone, 2000; Díaz Zorita *et al.*, 2002; Martínez y Cordone, 2003; Salvagiotti *et al.*, 2005; Gutiérrez Boem *et al.*, 2007).

Retorno de la inversión en fertilización

El retorno de inversión (RI) en fertilización, para la rotación M-T/Sj, no registró efecto de sitio ($p=0,1649$), pero sí efecto de tratamiento ($p=0,0006$), e interacción sitio*tratamiento ($p=0,0082$). En Balducchi, los manejos con mayor índice de retorno fueron NPS (2,38 US\$ US\$⁻¹), NS (2,21 US\$ US\$⁻¹), seguidos de PS (1,88 US\$ US\$⁻¹) y NP (1,60 US\$ US\$⁻¹). En San Alfredo, con un RI medio de 1,61 US\$ US\$⁻¹,

no se detectaron diferencias entre tratamientos. Bajo rotación M-Sj-T/Sj, se registró efecto de sitio ($p=0,0337$), tratamiento ($p<0,0001$), e interacción sitio*tratamiento ($p=0,0035$). En La Blanca, se determinaron diferencias significativas entre NP (1,35 US\$ US\$⁻¹) respecto de PS (1,80 US\$ US\$⁻¹) y NS (1,85 US\$ US\$⁻¹), mientras que NPS (1,62 US\$ US\$⁻¹) no se diferenció de ningún tratamiento. En La Hansa, el tratamiento NS registró el mayor retorno (2,37 US\$ US\$⁻¹) seguido de NPS, PS, y NP con 1,72, 1,48, y 1,27 US\$ US\$⁻¹, respectivamente. En Lambaré, el sitio de mejores condiciones iniciales de fertilidad, solo resultó rentable el tratamiento NS (1,64 US\$ US\$⁻¹), mientras que el resto de los tratamientos registró un RI medio de 0,89 US\$ US\$⁻¹ invertido (Fig. 7). Estos resultados, indican que la rentabilidad media de la práctica en Lambaré, con un manejo nutricional razonable dados los altos niveles de P en el suelo, fue de un 64%.

La fertilización con S fue la que mejor pagó la inversión en fertilización en ambas rotaciones (Tabla 3), relacionado al bajo costo relativo de las fuentes de S y a la creciente respuesta general de los cultivos a la fertilización azufrada.

Tabla 3. Lucro cesante por omisión de nutrientes expresado como la diferencia en margen bruto parcial (MBP, US\$ ha⁻¹) acumulado entre el tratamiento sin limitaciones nutricionales (NPS) y aquellos con omisión de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) a lo largo de la rotación; y retorno de inversión (RI, US\$ US\$⁻¹) para cada nutriente en los cinco sitios evaluados. Campañas 2000/01 a 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, y Lambaré) y 2001/02 a 2013/14 (La Hansa). Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Letras distintas indican diferencias significativas de MBP o RI dentro un mismo sitio (Tukey, 5%).

Table 3. Lost profits expressed as the difference of cumulative partial benefits (MBP, US\$ ha⁻¹) between the no nutrient limited treatment (NPS) and those with the omission of nitrogen (N), phosphorus (P) or sulfur (S); and their respective return on investment (RI, US\$ US\$⁻¹) for each nutrient at the five sites. Cropping seasons 2000/01 to 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, & Lambaré) and 2001/02 to 2013/14 (La Hansa). Crop Nutrition Network of CREA Southern Santa Fe Region. Different letters indicate significant differences of MBP or RI between nutrients within the same site (Tukey, 5%).

Rotación	Sitio	MBP acumulado (US\$ ha ⁻¹)			RI (US\$ US\$ ⁻¹)		
		N	P	S	N	P	S
M-T/Sj	Balducchi	3635 a	2611 b	3323 ab	3,53 b	2,90 b	11,63 a
	San Alfredo	1915 a	1697 a	963 a	1,35 a	1,38 a	2,33 a
M-Sj-T/Sj	La Blanca	397 a	494 a	959 a	1,33 b	1,34 b	3,60 a
	La Hansa	1279 a	-48 b	1448 a	2,10 a	0,97 b	5,14 a
	Lambaré	-400 a	-1542 b	-282 a	0,66 a	-0,15 b	0,17 a

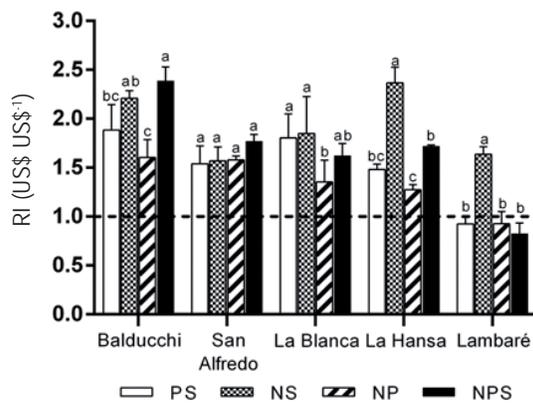


Figura 7.

Retorno medio de inversión (RI, US\$ US\$⁻¹ invertido) de los diferentes tratamientos de fertilización en los cinco sitios evaluados. Campañas 2000/01 a 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, y Lambaré) y 2001/02 a 2013/14 (La Hansa). Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. La línea punteada horizontal indica el umbral de indiferencia. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de un mismo sitio (Tukey, 5%).

Figure 7.

Return on investment (RI, US\$ US\$⁻¹) of fertilized treatments at the five experiment sites. Cropping seasons 2000/01 to 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, & Lambaré) and 2001/02 to 2013/14 (La Hansa). Crop Nutrition Network of CREA Southern Santa Fe Region. Dotted line indicates the indifference threshold. Different letters indicate significant differences between treatments within the same site (Tukey, 5%).

Esta tendencia creciente de casos con respuesta a la aplicación de S en cultivos extensivos se ha documentado extensamente para la región pampeana desde finales de la década de los '90 (Martínez & Cordone, 2000; Díaz Zorita *et al.*, 2002; Martínez & Cordone, 2003; Salvaggiotti *et al.*, 2005; Reussi Calvo *et al.*, 2006; Gutiérrez Boem *et al.*, 2007; Pagani *et al.*, 2009). La respuesta esperada en rendimiento para trigo, maíz y soja en la región pampeana es de alrededor de 10% (Steinbach & Álvarez, 2014; Carciocchi *et al.*, 2015). Esta condición sumada a que el S es un nutriente acompañante en la formulación de fuentes fosforadas y nitrogenadas, y que las fuentes como yeso agrícola (0-0-0-16S) o S elemental poseen un bajo costo, hacen de la fertilización azufrada una interesante inversión.

La fertilización fosforada, por su parte, tuvo impactos menos positivos sobre los MBP y registró los menores niveles de RI (Tabla 3). Es importante destacar que las dosis de P aplicadas fueron de reposición más un 5-10%, aun en situaciones de alto nivel de P_{Bray-1} inicial como los de Lambaré y La Hansa, para los cuales no se hubiera recomendado fertilización fosforada en condiciones de producción comercial. Sin embargo, es pertinente destacar que la omisión o no de P (u otro nutriente) implica un costo/beneficio "oculto" (o internalidad) correspondiente al empobrecimiento o construcción de los niveles del nutriente en el suelo que generalmente no es considerado en las evaluaciones eco-

nómicas de los programas de fertilización (Viglizzo *et al.*, 2011; Cordone & Trossero, 2012; Sutton *et al.*, 2013).

Para los mismos sitios experimentales, Ciampitti *et al.* (2011a) estimaron relaciones entre el balance de P (kg P ha^{-1}) y los cambios en el análisis de $\text{P}_{\text{Bray-1}}$ en la capa superficial (0-20 cm). A partir de dichas estimaciones, se utilizó un valor nominal de $2,7 \text{ kg de P ha}^{-1}$ por cada unidad de cambio de $\text{P}_{\text{Bray-1}}$ (mg P kg^{-1}). De este modo, luego de la decimocuarta campaña, la omisión de P (NS) generaría costos "ocultos" de -270 y $-323 \text{ US\$ ha}^{-1}$ en los sitios con mayores niveles de $\text{P}_{\text{Bray-1}}$ al inicio de los ensayos (La Hansa y Lambaré), mientras que en el resto de los sitios (inicialmente con bajo nivel de $\text{P}_{\text{Bray-1}}$) no se registran costos ocultos considerables. Sin embargo, la fertilización con P en los sitios con baja fertilidad fosforada, generaría reservas entre $+210$ y $+378 \text{ US\$ ha}^{-1}$ en el suelo como $\text{P}_{\text{Bray-1}}$ (Tabla 4). Cabe señalar, que estas diferencias no implican que el P del suelo no se agote sin reposición en suelos con bajo nivel de $\text{P}_{\text{Bray-1}}$, ni tampoco que no se acumule en casos con altos niveles. En este sentido, es relevante el rol de las diferentes fracciones que componen el P del suelo (además de los cuantificados con la extracción Bray-1) que pueden actuar ya sea como fuente o bien como destino de P en casos de déficit o de balances positivos del nutriente (Ciampitti *et al.*, 2011b). Este simple ejemplo, nos invita a considerar que son meritorios análisis más detallados de los costos/beneficios

ocultos relacionados a la degradación o construcción de calidad del suelo, y representan uno de los pendientes para futuras líneas de investigación.

CONCLUSIONES

- El análisis de experimentos de largo plazo, como el expuesto en este trabajo, representa y propone un enfoque diferente en materia económica de la inversión en fertilización. Si bien los tratamientos pueden no representar de manera estricta la situación agrícola de coyuntura, si representan un gradiente de escenarios donde es posible analizar el efecto del manejo de la nutrición de cultivos sobre la evolución de variables edáficas, productivas y, como en este caso, económicas.
- La disponibilidad de nutrientes en el suelo, la historia del lote, la rotación y el nivel de rendimiento de los cultivos determinaron respuestas, eficiencias y resultados económicos específicos por sitio. Por ello, se destaca la importancia de realizar un diagnóstico integral de cada situación para así lograr las mejores eficiencias de uso de los nutrientes.
- En general, las mayores ganancias acumuladas correspondieron al manejo más intensivo (NPS), lo que indica que además de los beneficios sobre la fertilidad del suelo, se generó un efecto económico positivo.

Tabla 4. Valoración económica (US\$) de los cambios en el P del suelo ($\text{P}_{\text{Bray-1}}$, 0-20 cm) bajo diferentes manejos de fertilización fosforada para los cinco sitios evaluados. Campañas 2000/01 a 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, y Lambaré) y 2001/02 a 2013/14 (La Hansa). Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Para las estimaciones se utilizó una equivalencia igual a 0.37 unidades de $\text{P}_{\text{Bray-1}}$ (mg P kg^{-1}) por cada un kg P ha^{-1} (Ciampitti *et al.*, 2011a), y un costo medio de $2,86 \text{ US\$ kg P}^{-1}$. Letras distintas indican diferencias significativas de $\text{P}_{\text{Bray-1}}$ entre tratamientos dentro de un mismo sitio (Tukey, 5%).

Table 4. Economic value (US\$) of soil test P changes ($\text{P}_{\text{Bray-1}}$, 0-20 cm) under different P fertilization management for the five experiment sites. Cropping seasons 2000/01 to 2013/14 (Balducchi, San Alfredo, La Blanca, & Lambaré) and 2001/02 to 2013/14 (La Hansa). Crop Nutrition Network of CREA Southern Santa Fe Region. For the purpose of estimating, an equivalent of 0.37 units of soil test $\text{P}_{\text{Bray-1}}$ (mg P kg^{-1}) per kg P ha^{-1} (Ciampitti *et al.*, 2011a), and an average cost of $2,86 \text{ US\$ kg P}^{-1}$ were used. Different letters indicate significant differences in $\text{P}_{\text{Bray-1}}$ between treatments within the same site (Tukey, 5%).

Rotación	Sitio	2014			NS	NPS
		Inicial	NS	NPS		
		----- $\text{P}_{\text{Bray-1}}$, mg kg^{-1} -----			----- $\Delta \text{ US\$ ha}^{-1}$ -----	
M-T/Sj	Balducchi	11	5 b	38 a	-45	+210
	San Alfredo	12	7 b	41 a	-36	+227
M-Sj-T/Sj	La Blanca	16	11 b	65 a	-40	+378
	La Hansa	45	10 b	53 a	-270	+63
	Lambaré	68	26 b	71 a	-323	+26

- La fertilización con S mejoró sensiblemente la rentabilidad de la práctica debido al bajo costo relativo de la fertilización azufrada, y a la creciente y cada vez más generalizada respuesta al nutriente.
- En el caso del P, donde es posible analizar la residualidad en el suelo, la valorización tanto del agotamiento como de la construcción de fertilidad fosforada (como $P_{\text{Bray-1}^*}$ 0-20cm) mostró resultados considerables a favor de la fertilización fosforada. Esto reafirma la importancia del seguimiento en el tiempo del análisis de suelo de cada lote y/o ambiente, y de su utilidad como herramienta de diagnóstico al momento de la toma de decisión de la fertilización, pensando más allá de una campaña.
- Finalmente, en función del sitio, no fertilizar generó lucros cesantes desde 77 a 392 US\$ ha⁻¹ año⁻¹, cuyos respectivos retornos de inversión serían de 1,64 y 2,38 US\$ por cada 1 US\$ invertido. Esta utilidad no percibida, sumada a la degradación del recurso suelo, ratifica la necesidad de un correcto diagnóstico y consecuente manejo balanceado de la nutrición de los cultivos, pensando en sistemas de producción sustentables.

AGRADECIMIENTOS

A todos los productores, asesores técnicos y personal de la Región CREA Sur de Santa Fe, y a Agroservicios Pampeanos (ASP) por su apoyo continuo a la Red de Nutrición.

BIBLIOGRAFÍA

- Agromercado. 2014. Series históricas. Disponible en: <http://www.agromercado.com.ar/?economico>
- BCRA (Banco Central de la República Argentina). 2014. Estadísticas monetarias y financieras. Disponible en: <http://www.bcra.gov.ar/index.asp>
- Bray, RH & L Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available form of phosphorus in soil. *J. Soil Sci.* 59: 360-361.
- Bolsa de Cereales. 2015. Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada. Disponible en: <http://www.bolsadecereales.org/retaa>
- Boxler, M; FO García; AA Correndo; S Gallo; R Pozzi; M Uranga; M. Salinas; NI Reussi Calvo & A. Berardo. 2015. Red de ensayos en nutrición de cultivos Región CREA Sur de Santa Fe. Resultados de la campaña 2014/15: Soja. Disponible en: <http://research.ipni.net/page/RLAS-2531>
- Bruulsema, TW; C Witt; FO García; S Li; TN Rao; F Chen & S Ivanova. 2008. A Global Framework for Fertilizer BMPs. *Better Crops* 92(2): 13-15. IPNI. Norcross, EE.UU.
- Calviño, PA & M Redolatti. 2004. Respuesta al agregado de fósforo en el cultivo de soja en el sudeste de Buenos Aires. I: Elementos de diagnóstico. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 22 a 24 de Junio, Paraná, Entre Ríos. Actas Cd-Rom.
- Carciochi, W; GA Divito; NI Reussi Calvo & HE Echeverría. 2015. ¿Qué sabemos del diagnóstico de azufre en los cultivos de la región pampeana argentina?. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. IPNI Cono Sur.* Acassuso, Buenos Aires. 18: 22-28.
- Cassman, KG; SK De Datta; S Amarante; S Liboon; MI Samson & MA Dizon. 1996a. Long-term comparison of the agronomic efficiency and residual benefits of organic and inorganic nitrogen sources for tropical lowland rice. *Experimental Agric.* 32: 427-444.
- Cassman, KG; GC Gines; MA Dizon; MI Samson & JM Alcantara. 1996b. Nitrogen-use efficiency in tropical lowland rice systems: contributions from indigenous and applied nitrogen. *Field Crops Res.* 47: 1-12.
- Ciampitti, IA; FO García; LI Picone & G Rubio. 2011a. Phosphorus balance and soil extractable dynamics in field crops rotations in Pampean soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75: 131-142.
- Ciampitti, IA; LI Picone; G Rubio & FO García. 2011b. Pathways of phosphorous fraction dynamics in field crop rotations of the Pampas of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75: 3: 918-926.
- Collino, D; F Salvagiotti; A Perticari; C Piccinetti; G Ovando; S Urquiaga & RW Racca. 2015. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationship with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil*, April 2015. DOI: 10.1007/s11104-015-2459-8.
- Conforto, EC; G Ficoni; A Rovea; M Boxler; C Oddino; J García; G March; J Meriles & S Vargas Gil. Evaluación del efecto de la fertilización sobre las comunidades microbianas edáficas. Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs. El Suelo: el pilar de la agroindustria en la pampa argentina. 31 de Mayo al 4 de Junio de 2010. Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Cordone, G & M Trossero. 2012. Costo oculto privado y social del sistema productivo: La degradación del suelo pampeano. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. IPNI Cono Sur.* Acassuso, Buenos Aires. 7: 2-5.
- Correndo AA; M Boxler & FO García. 2012. Oferta hídrica y respuesta a la fertilización en maíz, trigo y soja en el norte de la región pampeana. Actas del XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16-20 Abril 2012. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. Cd-ROM.
- Díaz Zorita, M; FO García & R Melgar. 2002. Fertilización en soja y trigo-soja. Respuesta a la fertilización en región pampeana. Boletín Proyecto Fertilizar. EEA INTA Pergamino. 44 pp.
- Díaz Zorita, M. 2015. El valor de los estudios de largo plazo para el manejo de la nutrición de soja. Pp. 72-78. En: FO García & AA Correndo (eds). Actas del Simposio Fertilidad 2015: Nutriendo los Suelos para las Generaciones del Futuro. 19-20 de Mayo de 2015. Rosario, Santa Fe, Argentina. IPNI-Fertilizar AC. ISBN 978-987-24977-6-7.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Echeverría, H; C Navarro & F. Andrade. 1992. Nitrogen nutrition of wheat following different crops. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 118: 157-163.
- FAO-IFA. 2002. Los fertilizantes y su uso. 4ª. Edición. Roma, Italia. 77 pp.
- Ferraris, G; F Salvagiotti; P Prystupa & FH Gutiérrez Boem. 2004. Disponibilidad de azufre y respuesta de la soja de primera a la fertilización. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná.

- Ferraris, GN; M Toribio; R Falconi & L Couretot. 2015. Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos, el balance de nutrientes y su disponibilidad en los suelos en el largo plazo. Pp. 137-142. *En: FO García & AA Correndo (eds). Actas del Simposio Fertilidad 2015: Nutriendo los Suelos para las Generaciones del Futuro. 19-20 de Mayo de 2015. Rosario, Santa Fe, Argentina. IPNI-Fertilizar AC. ISBN 978-987-24977-6-7.*
- Ferreras, L; G Magra; P Besson; E Kovalevski & FO García. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 25(2): 159-172.
- Ferreras, L; GC Magra; SM Toresani; V Romagnoli; A Saperdi; ME Schiavón & M Migliorati. 2013. Red de Ensayos de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe: Cambios en parámetros edáficos en el período 2001-2012. Pp. 202-209. *En: FO García & AA Correndo (eds). Actas del Simposio Fertilidad 2013: Nutrición de Cultivos para la Intensificación Productiva Sustentable. 18-19 de Mayo de 2013. Rosario, Santa Fe, Argentina. IPNI-Fertilizar AC. ISBN 978-987-24977-4-3.*
- Gaines, TP & JA Mitchel. 1979. Chemical methods for soil and plant analysis. Tifton, University of Georgia. *Agronomy Handbook N° 1.* 105 pp.
- García, FO; M Boxler; J Minteguaga; R Pozzi; L Firpo; I Ciampitti; A Correndo; F Bauschen; A Berardo & N Reussi Calvo. 2010. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. 2a Ed. Buenos Aires, AACREA. 2010. 64 pp.
- González Sanjuán, MF; AA Grasso & J Bassi. 2013. Fertilizantes en Argentina: Análisis del Consumo. Pp. 7-10. *En: FO García & AA Correndo (eds). Actas del Simposio Fertilidad 2013: Nutrición de Cultivos para la Intensificación Productiva Sustentable. 18-19 de Mayo de 2013. Rosario, Santa Fe, Argentina. IPNI-Fertilizar AC. ISBN 978-987-24977-4-3.*
- Grossman, RB & TG Reinsch. 2002. Bulk density and linear extensibility. p. 201-228. *In: JH Dane and GC Topp (ed) Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.*
- Grümberg, B; C Conforto; A Rovea; M Boxler; G March; C Luna; J Meriles & S Vargas Gil. La glomalina, una glicoproteína producida por hongos micorrízicos, y su relación con la productividad del cultivo de maíz. Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. AACs. El Suelo: el pilar de la agroindustria en la pampa argentina. 31 de Mayo al 4 de Junio de 2010. Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Gupta, UC. 1967. A simplified method for determining hot-water soluble boron in podzols soils. *Soil Science* 103: 424-428.
- Gutiérrez Boem, FH; P Prystupa & GN Ferraris. 2007. Seed Number and Yield Determination in Sulfur Deficient Soybean Crops. *Journal of Plant Nutrition* 30: 93-104.
- Gutiérrez Boem, FH & F Salvagiotti. 2014. Soja: 479-508. *En: HE Echeverría & FO García (eds). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. 2a. ed. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-521-565-8.*
- Hornik, K. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. v3.1.2, <http://cran.r-project.org/doc/FAQ/R-FAQ.html>
- IMF. 2014. International Monetary Found. United States and the International Monetary Found. Disponible en: <http://www.imf.org/external/country/USA/index.htm>
- INDEC. 2014. Índices de precios. Disponible en: http://www.indec.mecon.ar/principal.asp?id_tema=10
- IPNI. 2013. 4R de la Nutrición de Plantas: Un Manual para Mejorar el Manejo de la Nutrición de Plantas. Bruulsema TW; P Fixen & G Sulewski (eds). 1ra Ed. Acassuso. International Plant Nutrition Institute. 140 pp.
- Johnson, GV. 1987. Sulfate: Sampling testing, and calibration. P. 89-96. *In: DJR Brown (ed). Soil testing: Sampling correlation, calibration and interpretation. SSSA Spec. Publ. 21. SSSA, Madison, WI.*
- Márgenes Agropecuarios. 2014. Estadísticas. Disponible en: <http://www.margenes.com/estadistica/>
- Martínez, F & G Cordone. 2000. Avances en el manejo de azufre: Novedades en respuesta y diagnóstico en trigo, soja y maíz. *En: Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2000". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.*
- Martínez, F & G Cordone. 2003. Fertilización en soja de primera y en trigo-soja de segunda en la región pampeana norte. *En: Satorre E. (ed). El Libro de la Soja. SEMA. Buenos Aires, Argentina.*
- Nelson, DW & LE Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *In: Methods of Soil Analysis. Sparks D L (ed), Part 3. SSSA Book Series 5. Soil Sci Soc Am USA. 962-1008.*
- Pagani, A; HE Echeverría; HR Sainz Rozas & PA Barbieri. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 26(2):183-193.
- Pagani, A; HR Sainz Rozas & HE Echeverría. 2009. Respuesta a nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en diferentes ambientes de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo* 27(1): 21-29.
- Pinheiro, J; D Bates; S DebRoy; D Sarkar & R Core Team. 2015. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-119, <http://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
- Reussi Calvo, NI; HE Echeverría & HR Sainz Rozas. 2006. Respuesta del cultivo de trigo al agregado de azufre en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 24(1): 77-87.
- Salvagiotti, F; G Gerster; S Bacigaluppo; J Castellarín; C Galarza; N González; V Gudelj; O Novello; H Pedrol & P Vallote. 2005. Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. *Ciencia del Suelo* 22(2): 92-101.
- Salvagiotti, F; KG Cassman; JE Specht; DT Walters; A Weiss & A Dobermann. 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: a review. *Field Crop Res.* 108: 1-13.
- Salvagiotti, F; J Castellarín; F Ferraguti & H Pedrol. 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ciencia del Suelo* 29 (2): 199-212.
- Schoney, RA. 1985. The economic impact of extended crop rotations on Saskatchewan grain farms. Analytical Division, Prairie Farm Rehabilitation Administration, University of Saskatchewan, Regina, Sask.
- Soil Survey Staff. 1975. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 436. Washington D.C.
- Steinbach, H & R Álvarez. 2014. Eficiencia de respuesta de trigo, maíz y soja a la fertilización azufrada en la región pampeana argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* No. 13, Marzo 2014. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires: 11-17.
- Sutton, MA; A Bleeker; CM Howard; M Bekunda; B Grizzetti; et al. 2013. Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution. Global Overview of Nutrient Management. Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh on behalf of the Global Partnership on Nutrient Management and the International Nitrogen Initiative.

- Thomas, GW. 1996. Soil pH and soil acidity. *In*: D.L. Sparks (ed) *Methods of soil analysis*. Part 3. Soil Science Society of America, Madison, WI. 475-490 p.
- Verdenelli, R; D Chavarria; A Rovea; S Vargas Gil & J Meriles. 2015. Efecto de la fertilización mineral sobre la actividad microbiana y propiedades químicas en suelos agrícolas de la provincia de Santa Fe - Argentina. Pp. 231-235. *En*: FO García & AA Correndo (eds). *Actas del Simposio Fertilidad 2015: Nutriendo los Suelos para las Generaciones del Futuro*. 19-20 de Mayo de 2015. Rosario, Santa Fe, Argentina. IPNI-Fertilizar AC. ISBN 978-987-24977-6-7.
- Viglizzo, EF; FC Frank, LV Carreño, EG Jobbágy, H Pereyra, J Clatt; D Pincén & FM Ricard. 2001. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology* 17: 959-973.
- Zentner, RP & CA Campbell. 1988. First 18 years of a long-term crop rotation study in Southwestern Saskatchewan: yields, grain protein and economic performance. *Can. J. Plant Sci.* 68(Jan): 1-21.