

Fertilización del trigo con P y N en siembra directa

Liliana Suñer y Juan A. Galantini

La siembra directa produce cambios en la dinámica de los nutrientes que podrían alterar el diagnóstico de fertilidad fosfatada. En la región semiárida, donde existe incertidumbre en la disponibilidad hídrica, el diagnóstico de fertilidad se debería ajustar más aún en base al conocimiento detallado de la interacción entre agua-nitrógeno-fósforo



El predominio de los sistemas agrícolas ha incrementado la tasa de extracción de fósforo (P), ampliando el área con baja disponibilidad, ya que las dosis de aplicación de fertilizantes han sido muy inferiores a la exportación (García & Ciampitti, 2007). Para mantener los niveles de producción, el P debe ser añadido al sistema suelo-planta como fertilizante, y reponer así lo que se extrae con la cosecha de granos (Vlek *et al.*, 1997). En particular, en el sudoeste bonaerense el nitrógeno (N) y el P son los nutrientes con mayor deficiencia comprobadas (Loewy & Puricelli, 1982). El P presenta interacciones con otros nutrientes, las cuales pueden ser de naturaleza antagónica como el caso de zinc (Zn) o positivas como con N, S, K, entre otros. De este modo, deficiencias de nutrientes como por ejemplo N o S, limitan la respuesta al P. El trigo (*Triticum aestivum* L.) es el cultivo que ocupa la mayor superficie en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires. En esta región se cultivan aproximadamente 1 millón de hectáreas anuales (Galantini, 2014), lo que representa el 20% de la superficie nacional. Los rindes promedios de la zona oscilan entre 1600 y 1900 kg ha⁻¹. La principal característica que define a la zona semiárida es la erraticidad de las precipitaciones, es decir, la variabilidad tanto en la distribución como en la cantidad, afectando la disponibilidad de agua para los cultivos. Una consecuencia directa de ello es la disparidad de los rendimientos interanuales de los cultivos.

En general, la adecuada nutrición del cultivo presenta un impacto positivo sobre la eficiencia en el uso del agua (EUA), consecuencia de una mejora en el crecimiento y en el rendimiento del cultivo. Algunos autores han observado, que el P incrementa la EUA y la tolerancia de los cultivos a la sequía a través del desarrollo temprano del cultivo que reduce la evaporación a favor de la transpiración del cultivo, con más raíces (mayor exploración del suelo) y más activas (Micucci, 2002).

Actualmente, cerca del 90% del área de cultivo de granos de Argentina se realiza bajo siembra directa (SD). Con el cambio del sistema de labranza, surgieron dudas en relación a los criterios para la recomendación de fertilización con P, los cuales se basan principalmente en experiencias con labranzas (Ron & Loewy, 1990). La falta de perturbación del suelo y el aporte de nutrientes en un suelo bajo sistemas de SD continuos produce cambios en la localización, distribución y dinámica de las formas de P que podrían alterar el diagnóstico de fertilidad.

Por lo tanto, bajo estas condiciones el diagnóstico de fertilidad debería ajustarse a los equilibrios de este nuevo ambiente edáfico, principalmente en esta zona semiárida donde la incertidumbre de las precipitaciones hace necesario conocer adecuadamente el sistema para optimizar la toma de decisiones. El objetivo fue evaluar la variabilidad del rendimiento y del P asimilado por la planta teniendo en cuenta el efecto de la fertilización fosfatada en combinación con diferente disponibilidad de N sobre la productividad cultivo de trigo y la eficiencia de uso del P.

Aspectos metodológicos

Durante los años 2008, 2010, 2011 y 2012 se realizaron ensayos de fertilización con dosis combinadas de fósforo (P) y nitrógeno (N) sobre el cultivo de trigo. Durante el año 2008, se realizaron dos ensayos de fertilización uno en el establecimiento Las Ruinas de la localidad de Tornquist (BA), y otro en el establecimiento Cumelén cercano al paraje Las Oscuras (BA), y durante los años 2010, 2011 y 2012 se aplicó el mismo diseño de ensayo, en diferentes lotes en el sitio Las Oscuras. Los lotes seleccionados tenían una historia de más de 10 años continuos con SD. El diseño experimental fue de bloques completamente aleatorizados, con tres bloques y 3 réplicas por parcela. El tamaño de las parcelas fue de 9 x 4 m (36 m²). En el año 2008 en Las Ruinas las dosis aplicadas fueron: 0, 8, 16, 20 y 30 kg P ha⁻¹ y en Cumelén: 0, 7, 11, 15, 18 kg P ha⁻¹. En los años 2010, 2011 y 2012 se utilizó 0, 7, 12, 16 kg P ha⁻¹. Las dosis se establecieron considerando las suministradas por el productor, según la aplicación que habitualmente realizaba en su establecimiento. En todos los caso el P se aplicó en la línea de siembra junto con las semillas. Simultáneamente, en todas las parcelas se aplicó N al voleo, en forma de urea (46-0-0). El N aplicado se calculó de acuerdo al N aportado por el fertilizante fosforado de manera que, con la suma de ambos, se alcancen las dosis de N de 0, 25, 50 y 100 kg N ha⁻¹.

Se extrajeron muestras de suelo compuestas por 30 submuestras en cada bloque previo a la aplicación de los fertilizantes (profundidad: 0-20 cm). Barbagelata & Melchiori (2008)

observaron, que a pesar de la marcada estratificación del P encontrada, la profundidad de muestreo de 0-20 cm tenía un mayor poder predictivo de la respuesta a la fertilización con P que la capa de suelo más superficial (0-5 cm).

En las muestras de suelo se determinaron N de nitratos (N-NO₃⁻), N total, Carbono orgánico total (COT), pH y las siguientes formas de fósforo: extraíble (Pe), orgánico (Po) e inorgánico (Pi).

Durante madurez fisiológica se cosechó manualmente el trigo para la determinación de materia seca total aérea (MS) y el rendimiento de grano. En grano y paja se determinó el P total. En los años 2010, 2011, 2012 se determinaron los componentes del rendimiento: índice de cosecha (IC); espigas por unidad de superficie (esp m⁻²), granos por espiga (g esp⁻¹), peso de 1000 granos.

Se probaron diferentes modelos entre los datos de rendimiento y las dosis de P aplicadas. Se seleccionó el de mejor ajuste, correspondiendo el mismo a la ecuación de regresión polinómica $Y = b_0 + b_1 P + b_2 P^2$, donde P es la dosis de fósforo aplicada e Y el rendimiento en grano, ambos en kg ha⁻¹. El coeficiente b₀ representa el rendimiento para la dosis testigo de P. Se derivó la ecuación seleccionada para obtener el producto marginal (PMG) y se obtuvo la dosis de máximo rendimiento (DM_{áx}).

Se calculó la eficiencia aparente de uso de fósforo (EUP) como:

$$EUP = (PMS_f - PMS_0) / P_f$$

Dónde: PMS_f = fósforo de la materia seca total aérea, a una determinada dosis; PMS₀ = fósforo de la materia seca total aérea del testigo; P_f = fósforo del fertilizante

La eficiencia de uso del agua, la producción de materia seca por unidad de agua utilizada, se calculó a partir de los datos de precipitación y el cambio en el almacenamiento de agua en el suelo durante los períodos de siembra y cosecha del trigo.

$$EUA: (kg\ mm^{-1}) = (kg\ de\ grano) / (ppcc + H_s - H_c)$$

Dónde: ppcc = precipitaciones en el ciclo del cultivo (mm); H_s = humedad del suelo a la siembra (mm); H_c = Humedad del suelo a la cosecha (mm)

Se realizó un ANAVA doble (dosis de P * dosis de N) comprobándose que existió interacción entre las dosis de ambos nutrientes. Por lo tanto, los datos de rendimiento y MS se analizaron

en función de las dosis de P en cada dosis de N. Todos los análisis estadísticos se hicieron utilizando el software INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2013).

Resultados y discusión

La Tabla 1 muestra las propiedades químicas de los suelos utilizados y las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo de trigo. Los años de estudio, fueron particularmente secos, con niveles de precipitaciones medias anuales muy por debajo de los valores históricos (650-700 mm). En cuanto a las propiedades químicas edáficas, la mayoría de los suelos presentaron niveles aceptables de disponibilidad de N a la siembra para el cultivo de trigo en la zona. También los niveles de MO se mantuvieron cercanos a los valores generales zonales (Landriscini *et al.*, 2015), siendo mayores en el suelo de Las Ruinas.

Tabla 1. Propiedades químicas de los suelos (0-20 cm) y lluvias durante el ciclo del trigo

Año	Localidad	N-NO ₃ ⁻ (kg ha ⁻¹)	Nt (%)	MO	pH	Pe	Po (ppm)	Pi	Lluvia ciclo (mm)	Lluvia anual	EUA
2008	Las Ruinas	60	0,157	3,7	6,4	28	208	360	191	530	7
	Cumelén	84	0,114	2,4	7,2	17	192	170	137	530	12
2010	Cumelén	8,4	0,09	2,4	7,4	16	182	166	246	533	11
2011	Cumelén	86,3	0.121	2.38	5.8	6,2	231	144	153	470	5,5
2012	Cumelén	65,8	0.12	2,47	6,2	16	314	197	252	624	5

N-NO₃⁻: Nitrógeno de nitratos, Nt: Nitrógeno total, MO: Materia orgánica, Pe: Fósforo extraíble; Po: Fósforo orgánico; Pi Fósforo inorgánico, EUA: Eficiencia del uso del agua para el lote sin aplicación de fertilizantes.

Los rendimientos del testigo en todos los lotes estudiados promediaron los 1915 kg ha⁻¹.

A modo de ejemplo, Cumelén (2008) donde en el suelo existió una baja disponibilidad inicial de Pe los incrementos que se produjeron en la MS durante el ciclo del cultivo fueron mayores. Si bien las tendencias fueron siempre positivas al aumentar la dosis de P, 50 kg N ha⁻¹ fue la dosis más adecuada en función a la disponibilidad de agua de ese año en particular.

En estas condiciones, se evidenció claramente como al aumentar la dosis de P aumentó la MS (Figura 1), es decir que aumentaría la eficiencia de utilización del N disponible.

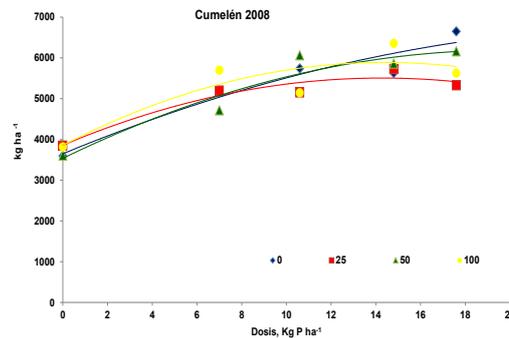
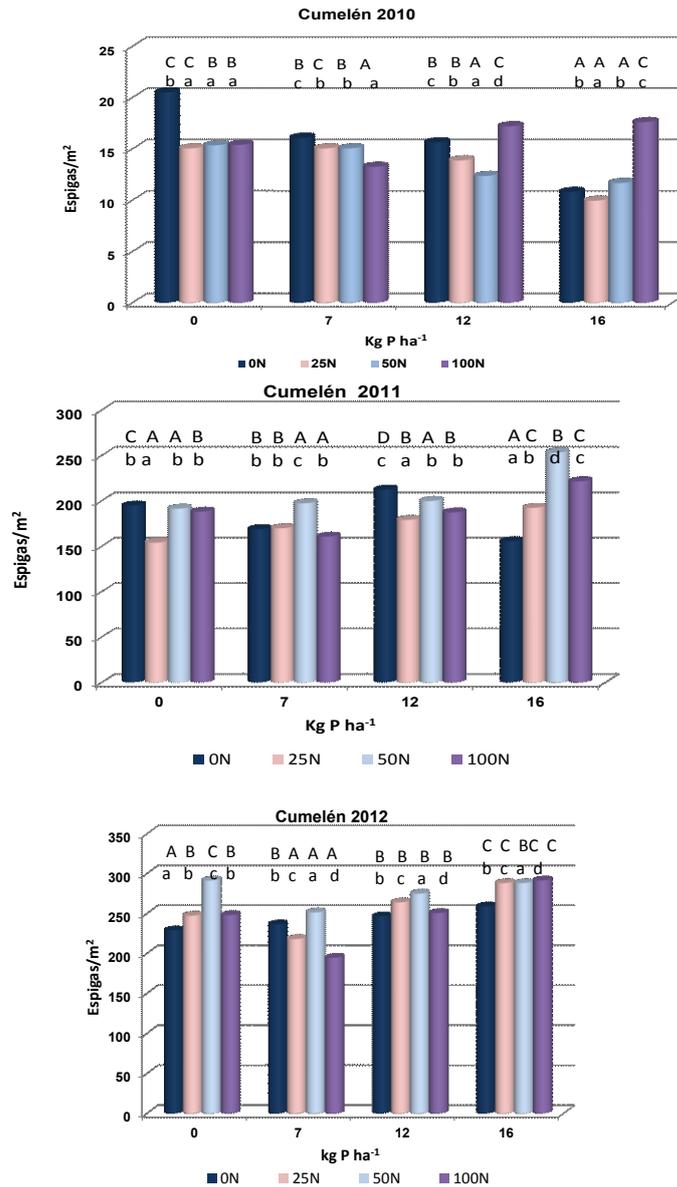


Figura 1. Materia seca total aérea del trigo en función de la dosis de P aplicada, según cada dosis de nitrógeno (0, 25, 50, 100 kg N ha⁻¹)

Se observó una tendencia general a disminuir la cantidad de P en la MS en la medida que se incrementó la dosis de P aplicada. Esto estaría indicando eficiencias negativas para todas las dosis (P) y combinación de dosis (N-P). Esta pérdida de P en los cultivos que tuvieron mayor disponibilidad no estaría asociada a excesos en la disponibilidad del nutriente, ya que en algunas situaciones se observó mayor producción de MS.

Parámetros de rendimiento

Analizando el número de espigas (Figura 2), se observa que con 50 kg de N la dosis óptima de P para el máximo rendimiento estaría cercana a la primera dosis de 7 kg (5,5 kg ha⁻¹). Las bajas precipitaciones durante la etapa inicial del cultivo, en la mayoría de los años, no produjeron diferencia en el número de espigas. Existió una fuerte interacción N - P - agua. El agregado de P favorece a usar más eficientemente el agua pero tiene que ir acompañado con una adecuada combinación de N de acuerdo a la condición de disponibilidad de agua.



Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,001$) entre las dosis de P a una misma dosis de N.
 Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,001$) entre las dosis de N a una misma dosis de P.

Figura 2. Espigas por metro cuadrado en función de la dosis de P aplicada, según cada dosis de nitrógeno (0, 25, 50, 100 kg N ha⁻¹)

Relación entre variables

Se aplicó un análisis estadístico que permite agrupar las variables más relacionadas, de este modo se lograron obtener dos componentes principales (CP). El CP1 agrupó P en grano y en MS, rendimiento en grano y MS, EUA y las lluvias del ciclo del cultivo. El CP2, que agrupó las variables con mayor contribución como formas de P disponible, inorgánico, orgánica y la relación P_o/P_o+P_i . Con la información brindada se puede inferir que la CP1 logró asociar

variables del cultivo y humedad. En tanto la CP2 asoció las variables relacionadas con las formas de P.

Relación con el rendimiento en grano y el P en materia seca

Al analizar el sistema utilizando todas las variables respecto al rendimiento de grano la mayor variabilidad de este parámetro se puede explicar con sistema de dos CP que en conjunto suman un 65% de explicación de la variabilidad (Figura 3). Una primera separa parámetros de absorción de P (Pgr y PMS) y formas de P (Pi, Pe y Po/Po+Pi) y una segunda que incorpora EUA y ppcc.

Cuando se consideraron todas las variables respecto al P en MS, la variabilidad total fue de 62%, se agrupan por un lado variables como RMS, EUA y ppcc, y por otro se seleccionan Pi, Pe y Po/Po+Pi. Lo que sugeriría que no sólo es importante el fósforo disponible en la solución del suelo sino también el resto de las formas de P, y sobre todo el equilibrio de las formas orgánicas con el P total (Po+Pi). Fernández *et al.* (2005) han demostrado el importante papel de la actividad de los microorganismos en el ciclo de los nutrientes, especialmente el P. Por tanto, el contenido de MO del suelo puede estar relacionado con la disponibilidad de P en virtud de su importancia como fuente de alimento para los microorganismos, no en virtud de su contenido en este nutriente (Needelman *et al.*, 1999). En este trabajo el análisis de los resultados ha demostrado que el fósforo que asimila la planta depende no sólo del P disponible para el cultivo. Sino también del Pi, y del equilibrio de las formas orgánicas con el total del suelo (Po+Pi).

Zilio *et al.* (2014) encontraron que las precipitaciones durante el ciclo fue la variable meteorológica que más explicó la variabilidad de los rendimientos. Mediante el uso de árboles de regresión se pudo detectar el efecto de las precipitaciones durante el ciclo, generando umbrales que predicen a los parámetros evaluados. Como puede observarse en la Figura 4 para rendimiento en grano la primera separación de grupos de casos, se da para 218 mm en el ciclo de cultivo. En los cinco ensayos estudiados, precipitaciones menores a 218 mm durante el ciclo del cultivo permitieron rendimientos del orden de los 1600 Kg ha⁻¹ y precipitaciones mayores a 218 mm posibilitaron rendimientos que promediaron los 2100 Kg ha⁻¹.

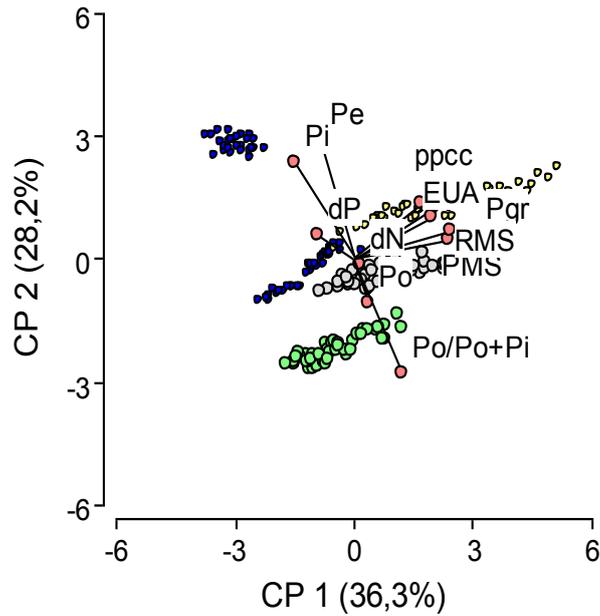


Figura 3. Componentes principales en las que intervienen todas las variables analizadas en relación al rendimiento en grano

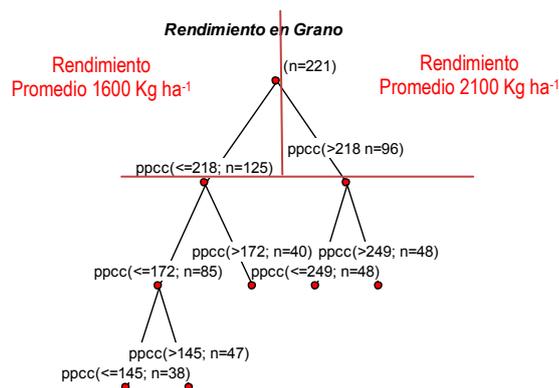
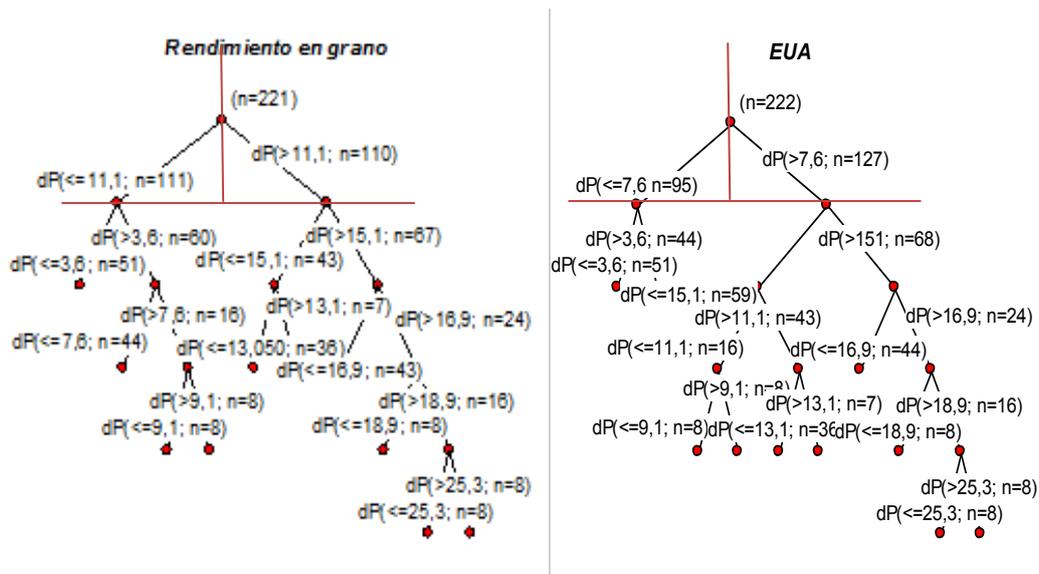


Figura 4. Árbol de regresión de los rendimientos de trigo, en grano, en función de las precipitaciones en el ciclo del cultivo.

Se utilizó la dosis de fósforo como variable en arboles de regresión (Figura 5) para rendimiento en grano pudiendo separar en umbrales según la dosis aplicada. En los ensayos evaluados, se observó que el rendimiento en grano aumentó marcadamente con una dosis de 11 kg P ha⁻¹. Por otro lado, una dosis de 7,6 Kg P ha⁻¹ mejoró la eficiencia del uso del agua.



Se indica la variable explicativa y su valor crítico y el número de datos que integra el grupo
 Figura 5. Árboles de regresión del rendimiento en grano y de la eficiencia en el uso del agua (EUA) en función de las dosis de fósforo aplicada.

Conclusiones

Cuando la disponibilidad de agua para el cultivo es muy inferior a su requerimiento, la efectividad en la aplicación de fertilizantes se evalúa más acertadamente a partir de la cuantificación de la producción materia seca total del trigo y no del aumento de su rendimiento. Existe un equilibrio dinámico y sensible entre la disponibilidad de N, P y agua en el suelo que obliga a tener en cuenta los tres factores simultáneamente al momento de diseñar estrategias de fertilización. La fertilización fosfórica logra hacer más eficiente el uso del agua, contrarrestando los efectos adversos de un año más seco.

La evaluación de la eficiencia de uso del fertilizante debe tenerse en cuenta como una herramienta adicional, pero no es un parámetro determinante en la toma de decisiones.

La absorción de fósforo por el cultivo de trigo está asociada a “todas” las formas de P analizadas. El rendimiento del cultivo de trigo está relacionado con la absorción de fósforo, por ello una estrategia adecuada debe contemplar la fertilización fosforada y el mantenimiento de niveles adecuados de las diferentes formas de P, en particular el Po.

Bibliografía consultada

- Galantini J.A., J.O. Iglesias, A.M. Miglierina, R.A. Rosell, A. Glave. 1992. Rotación y fertilización en sistemas de producción de la región semiárida argentina. I. Productividad (calidad y rendimiento) del trigo. [Rev. Fac. Agronomía \(U.B.A.\) 13 \(1\) 67-75.](#)
- Johnson C.; Ulrich A. 1959. II Analytical methods. For use in plant analysis. 26-77. California Agricultural Experimental Station Bulletin 766.
- Loewy T., Puricelli C.A. 1982. Disponibilidad de Fósforo en suelos del área de la E.E.A. Bordenave. Informe Técnico n° 28.
- Loewy T., Sewald H. A. 1980. Fertilidad nitrogenada para trigo en suelos del SO bonaerense. IX Reunión Argentina de la ciencia del suelo II: 533-536.
- Martínez J.M.; Galantini, J.A.; Landriscini. M.R. 2015. Eficiencia en el uso del nitrógeno del trigo en la región semiárida de la provincia de Buenos Aires (Argentina): efectos del momento de aplicación. [Agriscientia 32 \(1\): 15-27.](#)
- Maske G.G.; Ortiz-Monasterio J.I.; Van Ginkel M.; Gonzales R.M.; Fischer R.; Rajaram S.; Vlek P. 2001. Importance of P uptake efficiency versus P utilization for wheat yield in acid and calcareous soils in Mexico. *Europ. J. Agron.* 14: 261-274.
- Micucci F.; Álvarez, C. 2002. Impacto de las prácticas de manejo sobre la eficiencia de uso del agua en los cultivos extensivos de la región pampeana argentina. *Archivo Agronómico N° 6, Informaciones Agronómicas del Cono Sur N° 15.* INPOFOS Cono Sur, Argentina
- Minoldo G. 2010. Impacto de largo plazo de diferentes secuencias de cultivo del sudeste bonaerense sobre algunas propiedades químicas del suelos, y la productividad del trigo. Tesis Mag. Ccias. Agrarias. UNS Bahía Blanca. 153 p.
- Murphy J.; Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.* 27:31-36.
- Needelman B.A.; Wander, M.M.; Bollero, G.A.; Boast, C.W.; Sims, G.K.; Bullock, D.G. 1999. Interaction of Tillage and Soil Texture: Biologically active soil organic matter in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1326-1334.
- Ron M.M.; Loewy, T. 1990. Fertilización fosfórica del trigo en el sudoeste bonaerense. I. Modelos de la respuesta. *Ciencia del Suelo*, 8(2): 187-194
- Saunders, W.; Williams, E.G. 1955. Observations on the determination of total organic phosphorus in soil. *J. Soil Sci.* 6:254-267
- Suñer L.; Galantini J. 2012. Fertilización fosforada en suelos cultivados con trigo de la región pampeana. [Ciencia del Suelo 30\(1\) 57-66.](#)
- Suñer, L.; Galantini, J.; Minoldo, G. 2014. Dynamics of soil P forms in wheat-based crop sequences in the semiarid region of Argentina. [Applied and Environment Soil Science. 6 pag.](#)
- Suñer L.; Galantini, J.; Varela, P.; Rosell, R. 2007. Estratificación de las formas de fósforo en Siembra Directa y su relación con la disponibilidad para los cultivos. En “La siembra directa en los sistemas productivos del S y SO Bonaerense”, [Revista Técnica Especial AAPRESID](#), CIC, CERZOS y UNS. Eds. Galantini et al. 28-31.
- Suñer L.G.; Galantini, J.A.; Rosell, R.A. 2005. Cambios del fósforo en suelos bajo diferentes rotaciones de cultivos. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur INPOFOS N° 25.*
- Suñer L.G.; Galantini, J.A.; Rosell, R.A.; Chamadoira, M.D. 2002. Cambios en el contenido de las formas de fósforo en suelos de la región semiárida pampeana cultivados con trigo (*Triticum aestivum*). [Rev. Fac. Agron. La Plata 104\(2\): 105-111.](#)
- Suñer L.; Galantini, J. 2013. Dinámica de las formas del P en suelos de la región sudoeste pampeana: estudio de la incubación con fertilizante fosfatado. [Ciencia del suelo 31:33-44](#)