

Dinámica de las formas de fósforo en el suelo y su relación con la productividad del cultivo

Liliana Suñer, Juan Manuel Martínez, Matías Duval, Fernando López, María Rosa Landriscini y Juan A. Galantini

Las características edafoclimáticas de los suelos del sudoste bonaerense condicionan la dinámica del fósforo en su relación suelo-planta. Podría esperarse una mejora del rendimiento si se desarrollan estrategias de fertilización específicas para esta región.



En las regiones semiáridas y subhúmedas el diagnóstico de la fertilidad edáfica adquiere un papel relevante, ya que los rendimientos se encuentran limitados por la falta de agua (Martínez *et al.*, 2015). Por otro lado, la disponibilidad de P para los cultivos, depende de variables que intervienen en el ciclo biogeoquímico de este nutriente. La complejidad química y la variabilidad espacial del P en los suelos dificultan la identificación de las diferentes formas de P y la determinación de su disponibilidad real para el cultivo (Hsu, 1966; Webber, 1978; Pierzynski *et al.*, 1990). El contenido de P total del suelo puede ser relativamente alto, desde 200 a 5000 mg kg⁻¹ (Kuo, 1996), y la capacidad del suelo de proveer P es muy variable. Aun cuando la reserva de P total en el suelo exceda ampliamente los requerimientos del cultivo, éste podría sufrir deficiencias.

Los suelos bajo cultivo pierden P a través de la exportación con los productos de cosecha (granos, frutos, forrajes) y, eventualmente, por erosión. Los primeros efectos se ven en las caídas del P orgánico, ya que la materia orgánica (MO) disminuye rápidamente cuando los suelos se cultivan: un 1% de pérdida de MO puede representar una pérdida de 80-120 kg ha⁻¹ de P de la capa superficial (Tiessen *et al.*, 1984; Vázquez, 2002).

En Argentina se ha incrementado notablemente la aplicación de nutrientes vía fertilizantes en los últimos años. Sin embargo, la relación aplicación/remoción todavía muestra un balance negativo reponiéndose un 59% del P extraído en grano por los cuatro cultivos principales (soja, maíz, trigo y girasol, García & Ciampitti, 2007). Estas cifras son similares a las que se han observado en los últimos 7-8 años e indican que el fuerte crecimiento en el uso de fertilizantes todavía no alcanza a compensar el crecimiento notable que se ha registrado en la producción de granos.

En la mayoría de los suelos agrícolas, el P orgánico comprende aproximadamente entre un 20-80% del total de P del suelo (Gahoonia & Nielsen, 2004). En la Argentina, el P orgánico representa entre el 78% y 83% del P total en suelos Molisoles del sudeste de la provincia de

Buenos Aires (Diez *et al.*, 2000; Picone & Zamuner, 2002); mientras que en suelos Vertisoles y Alfisoles de la provincia de Entre Ríos oscila entre el 41% y 74% del P total en los horizontes superiores (Boschetti *et al.*, 2000; Pascale *et al.*, 2000). En el oeste de la provincia de Buenos Aires se ha encontrado que el Po representa entre el 29 y 51% de la reserva total (Galantini *et al.*, 1997). Varios estudios realizados en los suelos de la región pampeana (Hepper, 1996; Vazquez, 2002), evidencian pérdidas importantes de P total, debidas principalmente a las fracciones más lábiles inorgánicas y orgánicas y es aquí donde radica la importancia del Po para determinar la disponibilidad de P del suelo (Andersohn, 1996). En el sudoeste bonaerense, con suelos de texturas gruesas y bajos niveles de materia orgánica, es escasa la información disponible sobre la dinámica del P, especialmente en los sistemas en siembra directa.

El manejo sustentable de las tierras necesita poder anticipar los efectos de su uso (Echeverría *et al.*, 2012), de manera que cuando el desarrollo de los cultivos agrícolas tienda a ser máximo, al mismo tiempo la degradación del ambiente y del suelo sea mínima (Reynolds *et al.*, 2009). En estos ambientes frágiles la relación costo-beneficio podría ser alta si no se realiza un diagnóstico adecuado. Por otro lado, se podría esperar una mejora del rendimiento si se desarrollan estrategias de recomendación de fertilización precisas para la región del sudoeste bonaerense.

El objetivo de este trabajo fue evaluar parámetros edáficos y de productividad en sitios con diferencias edafoclimáticas con el propósito de generar conocimiento que permita comprender mejor la dinámica del fósforo en el suelo y su relación con la productividad.

Aspectos metodológicos

Durante los años 2010, 2011 y 2012 se muestrearon 111 lotes de productores, bajo siembra directa, cultivados con trigo (*Triticum aestivum* L.) y con cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.), situados en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina), pertenecientes a las regiones semiárida y subhúmeda (Figura 1). Mayores detalles de los lotes fueron presentados por Martínez *et al.* (2015). Se muestrearon entre dos a diez lotes por campo. En el año 2010 se muestrearon un total de 33 lotes en 8 establecimientos agropecuarios, en el 2011 los lotes muestreados fueron 37 en un total de 12 establecimientos, y en el 2012 se muestrearon 11 establecimientos y el número de lotes ascendió a 41. Algunos establecimientos se repiten en los años.

En cada uno de los lotes se seleccionaron tres áreas de muestreo georreferenciadas, homogéneas y uniformes de aproximadamente 50 m², siendo estas representativas de los lotes para reducir la variabilidad espacial. El muestreo se llevó a cabo en esas áreas de muestreo en las profundidades de 0-20 cm, durante el invierno antes de la siembra del cultivo de trigo o cebada.

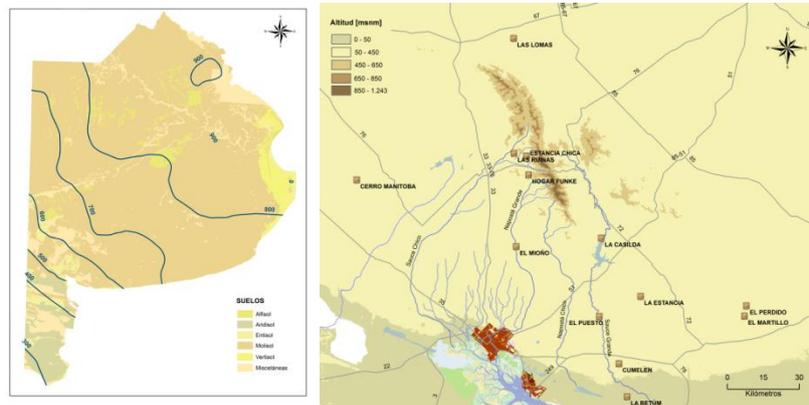


Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios muestreados en el sudoeste bonaerense de la Provincia de Buenos Aires, Argentina

En las muestras de suelo se determinó: pH (relación suelo:agua 1:2,5); Contenido de carbono orgánico total (C), Nitrógeno total (Nt, Bremner, 1996); P extraíble (Pe, Bray & Kurtz, 1945); P inorgánico (Pi), y orgánico (Po) por el método de Saunders y Williams (1955); P total (Pt), mediante digestión con ácido perclórico empleando el procedimiento de (Sommer & Nelson 1972). Además se calculó la relación $Po/Po+Pi$, la cual da idea del “equilibrio” que puede existir entre el Po y el P total del suelo. Con respecto a los parámetros físicos se evaluó: textura, por el método de la pipeta (Gee & Bauder, 1986) y densidad aparente (Blake & Hartge, 1986). Posteriormente, se realizó la conversión de unidades para pasar de mg kg⁻¹ a kg ha⁻¹ utilizando la densidad aparente de cada sitio. Las propiedades edáficas de los sitios muestreados se detallan en la Tabla 1.

Se determinaron materia seca total aérea (MS) y rendimiento de grano (Rgr) al final del ciclo de cultivo. Sobre el material seco y molido se determinó el contenido de P en paja y grano.

La eficiencia de uso del agua, 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 periodos de siembra y cosecha del trigo (Quiroga et al., 2006).

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

Donde,

ppcc = precipitaciones en el ciclo del cultivo (mm)

Hs = humedad del suelo a la siembra (mm)

Hc = Humedad del suelo a la cosecha (mm)

Tabla 1. Propiedades químicas y físicas de los sitios muestreados para la profundidad de 0-20 cm (Año 2010)

Sitios	MO g kg ⁻¹	N inorg. kg ha ⁻¹	Pe mg kg ⁻¹	pH	Textura			DA Mg m ⁻³
					A	L	a	
					g kg ⁻¹			
1	25	35	20	7,0	414	380	206	1,15
2	24	81	26	7,4	567	399	34	1,26
3	23	34	15	6,7	368	404	228	1,18
4	22	45	19	6,2	751	154	95	1,27
5	28	135	22	6,2	466	321	214	1,25
6	24	46	14	6,4	541	284	176	1,18
7	24	83	26	6,0	615	177	208	1,31
8	58	107	10	7,6	254	538	208	1,13

MO, materia orgánica (g kg⁻¹); N inorg., nitrógeno inorgánico a la siembra en forma de N- nitratos (kg ha⁻¹); Pe, Fósforo extraíble (mg kg⁻¹); pH, potencial Hidrogeno; DA, densidad aparente (Mg m³). Textura: A, Arena; L, Limo; a, arcilla.

Zilio *et al.* (2014) analizaron variables meteorológicas y los rendimientos de trigo de cuatro secuencias estudiadas y encontraron que la precipitación acumulada durante el ciclo del cultivo (período agosto-noviembre) era la que más influía en los rendimientos. Por otro lado, Martinez *et al.* (2015) indicaron que las lluvias de primavera fueron las más influyentes sobre el rendimiento. Barbieri *et al.* (2008) trabajando en Argiudoles Típicos del Sudeste Bonaerense, indicaron que las precipitaciones registradas durante el ciclo del cultivo fueron las que más afectaron el rendimiento en grano, con un R² del 95%. En este estudio se consideraron las precipitaciones anuales y las ocurridas durante el ciclo del cultivo (ppcc), período agosto-noviembre.

Resultados y discusión

Las características edáficas y climáticas se resumen en la Tabla 2. Desde el punto de vista edafoclimático se pueden diferenciar dos ambientes, el subhúmedo (próximo a la Sierra) y el semiárido (sectores próximos a Bahía Blanca y la costa).

Variabilidad entre regiones

El análisis estadístico para las diferentes variables analizadas se presenta en la Tabla 3. En el año 2010 que fue un año con déficit hídrico severo, en ambas regiones no se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en los niveles de las diferentes variables analizadas. En el año 2011, que presentó escasez de agua pero no tan marcada como en 2010, se comienzan a observar diferencias significativas entre ambas regiones en algunas variables como precipitaciones durante el ciclo del cultivo, rendimiento en grano y fósforo disponible. Durante el año 2012 en donde hubo mayores precipitaciones en el mes de agosto y en noviembre se observa una diferencia significativa en la mayoría de las variables analizadas. Particularmente, teniendo en cuenta las condiciones edafoclimáticas evaluadas de los sitios estudiados, se evidenciaron diferencias estadísticas entre las regiones semiárida y subhúmeda de acuerdo al año climático y proporcional al aporte de lluvias, pero no en los tres años en conjunto.

Tabla 2. Tipo de suelo, características generales y climáticas (valores promedios) de los sitios muestreados

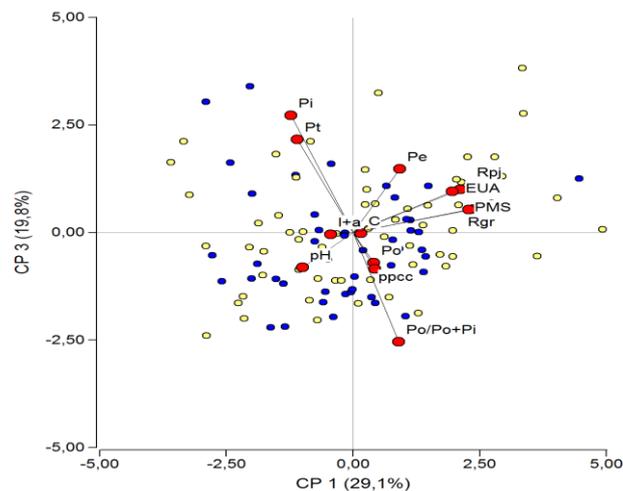
Cantidad de lotes (n)	Localidad más cercana	Región	Clasificación Taxonómica	Temperatura, °C					Precipitaciones	
				Temperatura, °C			Año	Ciclo		
				media	max	min	mm			
41	Tornquist	Subhúmeda	Argiudol Típico	14,5	20,9	8,2	695	255		
27	Las Oscuras	Semiárida	Argiustol Típico	15,0	21,4	8,6	533	246		
20	Cnel Dorrego	Semiárida	Argiustol Típico	14,7	20,9	8,4	648	282		
6	Pigue	Subhúmeda	Argiudol Típico	13,8	20,2	7,5	1045	410		
17	Saldungaray	Semiárida	Argiustol Típico	14,7	21,0	8,3	694	348		

Relación entre las variables analizadas

Del estudio de componentes principales con todas las variables involucradas surge que las variables se pudieron agrupar en dos componentes (CP1 y CP2) responsables del 50% de la variabilidad total aportada por los parámetros estudiados (Figura 2), y si se adiciona un tercer eje se aporta casi un 20% más (Figura 3). Por lo tanto se seleccionaron 3 componentes, un primer componente agrupa parámetros de cultivo (Rgr, Rpj y PMS) y de humedad como eficiencia en el uso del agua.

Una segunda componente agrupa las propiedades intrínsecas al suelo, como la granulometría (I+a). De esta manera, sobre el eje positivo del CP2 se ubican los suelos de textura más finas

proporción de cada tipo de material orgánico y que los suelos arenosos tienen la materia orgánica fácilmente descomponible, posiblemente son los suelos que se encuentran más asociados al P en la solución del suelo (P disponible). Esto coincide a lo concluido por Hassink *et al.* (1993) que informaron una mayor mineralización neta de la MO en los suelos arenosos con respecto a los arcillosos.



Puntos amarillos representan a la zona semiárida y puntos azules representan a la zona subhúmeda
 Figura 3. Bi-plot de componentes principales CP1 y CP3 para todas las variables estudiadas.

Se analizaron todas las variables en relación del rendimiento en grano, a fin de reconocer cuáles de las variables analizadas en los suelos estudiados ejercían mayor influencia en el rendimiento en grano. Fueron necesarios al menos tres componentes para conformar el vector de variación en una medida aceptable. En la Figura 4 se presenta el biplot entre las componentes 1 y 2. CP1 queda definido por las siguientes variables que se resultaron significativas Pt, Pi, PMS y EUA; para el CP2 quedaron seleccionadas L+a, C, Po y Pt. Por otro lado el CP3 seleccionó las variables relacionadas con la dinámica del fósforo Pe, Pt, Po y Po/Po+Pi.

Por otro lado se analizaron las variables en relación al P en materia seca, siendo éste el P que toma la planta, a fin de tratar de seleccionar aquellas variables que ejercieron mayor influencia en este parámetro. El análisis de componentes principales resultó en una explicación de la variación total del 69%. Fueron necesarios tres componentes para conformar el vector del nuevo sistema; un componente principal (CP1) fue el que más explicó esta variación y se encontró altamente influenciado por variables de cultivo, formas total e inorgánica de P y eficiencia en el uso de agua (Rpj, Rgr, Pi Pt, EUA). El componente CP2 asoció variables de calidad del suelo, prevaleciendo aquellas que ejercen influencia sobre los efectos de la biomasa microbiana (L+a, C, Po, Pt), y el tercer componente, CP3 que

asoció las formas de P (Pe, Pt, Po, Po/Po+Pi) y la EUA (Figura 5). Esto pone en evidencia que si bien se considera al Pe como la forma de fósforo edáfico que puede asimilar P la planta, en realidad no es específicamente el que regula la absorción del P por el cultivo. La absorción de P por la planta estaría más regulada por el contenido de Pt, Pi y la relación Po/Po+Pi. Evidenciando los complejos equilibrios del P en el sistema suelo-planta.

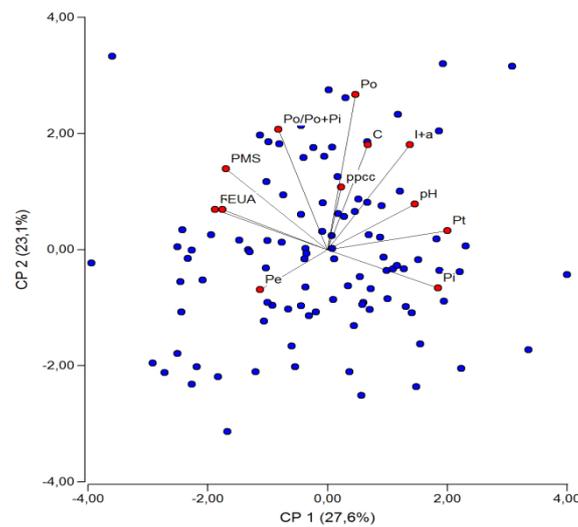


Figura 4. Bi-plot de componentes principales en relación al rendimiento en grano

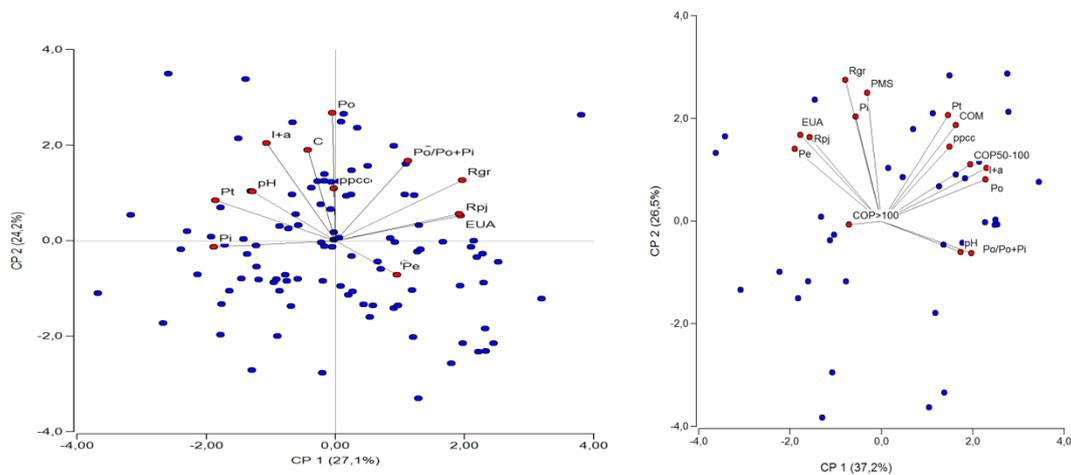


Figura 5. Bi-plot de componentes principales de todas las variables en relación al fósforo en materia seca y al rendimiento en grano

El contenido de materia orgánica total no es un buen indicador de la calidad o de la fertilidad del suelo, debido a que la mayor parte del material orgánico es estable y a que existen diferencias importantes en su calidad. En este sentido, Galantini & Rosell (2006) observaron que sistemas de producción contrastantes de la región semiárida pampeana tenían pequeñas diferencias en el contenido materia orgánica total pero diferencias significativas en la materia

orgánica "joven" o lábil, lo que se reflejaba en un aumento del rendimiento en grano y la cantidad nitrógeno tomada por el cultivo. Se relacionaron todas las variables con el rendimiento en grano, pero en este caso en lugar de incluir en el análisis de componentes principales el carbono orgánico total (C), se incluyeron las 3 formas carbono particulado. Con este nuevo análisis, las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2) explican el 64 % de la variabilidad total, permitiendo la representación gráfica de todas las propiedades medidas en un mismo plano (Figura 5). En los suelos estudiados, las fracciones granulométricas tienen gran importancia, sin embargo, para mejorar el ajuste es necesario incluirlo en regresiones múltiples con otros índices y parámetros tanto edáficos como climáticos. Las variables incluidas en el CP1 fueron L+a Pe, Po, Pt y la fracción particulada de COP50-100, esto estaría sugiriendo que la dinámica del P en SD estaría vinculada a la mineralización de la fracción lábil de la MO. El CP2 queda conformado básicamente por 5 variables, Rgr, PMS, Pi, Pt y COM evidenciando la importancia de la fracción COM en relación a la dinámica del P y la absorción por el cultivo.

Conclusiones

Particularmente las condiciones edafoclimáticas de los sitios evaluados, no mostraron una diferencia entre los sitios de la zona semiárida y subhúmeda. En este caso las diferencias se evidenciaron en mayor medida de acuerdo al año climático, pero no en los tres años en conjunto. En los años de estudio, diferencias estadísticamente significativas entre regiones (semiárida y subhúmeda) estuvieron indicadas por las diferencias en las precipitaciones durante el ciclo del cultivo, las cuáles provocaron diferencias principalmente en el año 2012. Las variables que más influenciaron el rendimiento en grano y en el fósforo asimilado por la planta estuvieron vinculadas tanto a las formas de P y la relación $Po/Po+Pi$, como a la materia orgánica lábil (COP50-100). Esto pone en evidencia la necesidad de considerar el equilibrio entre las diferentes formas de P y la dinámica del sistema que va a influir sobre la relación suelo-planta.

Bibliografía consultada

- Andersohn C. 1996. Phosphate cycles in energy crop systems with emphasis on the availability of different phosphate fractions in soil. *Plant & Soil* 184: 11- 21.
- Anderson G. 1980. Assessing organic phosphorus in soils. p. 411-431. In F.E. Khasawneh et al. (eds.) *The role of phosphorous in agriculture*. ASA, Madison, WI.
- Bray R.H.; Kurtz L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorous in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.
- Balesdent J.; Chenu C.; Balabane, M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Till. Res* 53: 215-230.
- Blake G.R., K.H. Hartge 1986. Bulk density. p. 363–375. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.*
- Boschetti N.G.; Valenti R.; Vesco C.; Sione M. 2000. Contenido de fósforo total en suelos con características vérticas de la provincia de Entre Ríos. *Rev. Facultad de Agronomía* 20: 53-58.
- Duval M.E.; Galantini J.A.; Iglesias J.O.; Canelo S.; Martínez J.M.; Wall L. 2013. Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural [Soil Till Res](#)
- Echeverría N.; Querejazu S.; De Lucia M.; Silenzi J; Forjan H.; Manso L. 2012. Estabilidad y carbono orgánico de agregados bajo rotaciones en siembra directa. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata.
- Gahoonia T.S.;Nielsen N.E. 2004. Roots traits as tools for creating phosphorus efficient crop varieties. *Plant and Soil* 260: 47-57
- Galantini J.A.; Landriscini M.R.; Miglierina A.M.; Iglesias J.O.; Rosell R.A. 1997. Formas de fósforo en Agroecosistemas de La Pampa. Argentina. VIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. La Serena. Chile.
- Galantini J.A., N. Senesi, G. Brunetti, R. Rosell. 2004. Influence of texture on the nitrogen and sulphur status and organic matter quality and distribution in semiarid Pampean grassland soils. *Geoderma* [123: 143-152](#).
- Galantini J.A.; Rosell R. 2006. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid pampean soils. *Soil Till. Res.* [84:75-79](#).
- García F.; Ciampitti I. 2007. Requerimientos nutricionales y balances de nutrientes. *Agromercado* 27 BsAs Argentina 2-6.
- Gee G. W.; Bauder J. W. 1986. Particle-size Analysis. In: *Methods of Soil Analysis* (Ed. A. Klute) Part 1 Madison. Wisconsin. USA.
- Hassink J.; Bouwman, L.A.; Zwart, K.B.; Bloem, J.; Brussaard, L. 1993. Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and C and N mineralization in grassland soils. *Geoderma* 57(1): 105-128.
- Hepper G.; Hevia G.; Buschiazzi D.E.; Urioste A.M.; Bono A. 1996. Efectos de la agricultura sobre fracciones de fósforo en suelos de la región semiárida pampeana central. *Ciencia del Suelo* 14 (2): 96-99.
- Hsu P.H. 1966. Formation of Gibbsite from Aging Hydroxy-Aluminum Solutions. *Soil Science Society of America Journal* 30: 173-176.
- Jackson M. L. 1958. *Soil chemical analysis*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- Kuo S. 1996. Phosphorus. In *Methods of soil Analysis 3-Chemical Methods* (Sparks et al. eds.). ASA, Madison, Wisconsin, USA. 894-895.
- 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): Momento de aplicación. *Agriscientia* 32 (1): 15-27.
- Pascale C.; Heredia O.; Giufre L. 2000. Distintas fracciones de P en suelos de Entre Ríos. *Revista Facultad de Agronomía* 20: 59-62
- Reynolds W.D.; Drury C.F.; Tan C.S.; Fox C.A.; Yang X.M. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152:
- Sainz Rozas H.; Echeverría H.E. 2008. Relevamiento de la concentración de fósforo asimilable en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana. XXI CACS.
- Saunders W.M., E. G. Williams. 1955. Observations on the determination of total organic phosphorus in soil. *J. Soil Sci.* 6:254-267
- Sawhney B.L. 1973. Electron Microprobe Analysis of Phosphates in Soils and Sediments. *Soil Science Society of America Journal* 37: 658-660
- Sommers L. E.; Nelson D. D.W. 1972. Determination of total phosphorus in soil. *Soil Science Society of American Proceeding* 36:902-904.
- Vazquez M.E. 2002. Balance y fertilidad fosforada en suelos productivos de la región pampeana. *Informaciones Agronómicas* 16: 3-7. IPNI Cono Sur. Acassuso, Bs. As., Argentina.
- Villamil M.B.; Bollero G.A.; Darmody R.G.; Simmons F.W.; Bullock D.G. 2006. No-Till Corn/Soybean Systems Including Winter Cover Crops: Effects on Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am J.* 70: 1936-1944.